



UXDB
优炫数据

多写多读共享存储数据库集群

演进与实践

—— UXDB SRAC 的技术传承与创新

北京优炫数据库股份有限公司

2026年8月

目录

摘 要	3
一 引言	3
1.1 数据库市场趋势与高端集群战略价值	3
1.2 集中式共享存储架构的不可替代性	3
1.3 Oracle RAC 行业地位与国产化紧迫性	4
1.4 多写多读共享存储技术，数据库工程“天花板”	5
二 共享存储集群技术在学术与产业的演进	6
2.1 共享存储架构的理论基础	6
2.2 Oracle RAC 技术演进与历史贡献	7
2.3 IBM Db2 pureScale 的并行实践	8
2.4 PostgreSQL 社区的集群探索	8
2.5 国内外学术前沿研究	9
2.6 国产数据库的相关行业实践	9
三 UXDB SRAC 技术架构	11
3.1 路线选择：多写多读共享存储的必然	11
3.2 全对称多写多读架构概览	11
3.3 核心子系统技术解读	12
3.4 性能特征与技术验证	15
四 优炫数据的行业实践与准备	15
4.1 科研仿真：极端条件下的能力验证	15
4.2 能源调度：大规模持续运行的保障	16
4.3 金融核心交易：能力准备与技术信心	17
4.4 电信运营支撑：能力储备与场景适配	17
4.5 政务与公共安全：替代合规能力支撑	18
五 技术展望与行业拓展	18
5.1 持续提升集群能力	19
5.2 行业市场拓展	19
六 结语	20
参考文献	20

摘要

本文从数据库产业格局与高端集群数据库的战略价值出发，系统梳理了多写多读共享存储数据库集群（Shared-Disk Multi-Writer Cluster）技术从理论萌芽到产业实践的演进历程。文章以 Oracle RAC 为核心参照系，深入分析了缓存融合（Cache Fusion）、全局事务并发控制、共享存储文件系统等核心技术原理，结合 VLDB、SIGMOD 等顶级学术会议的研究成果，全面展示了该领域的技术前沿。在此基础上，着重介绍了优炫数据库 UXDB SRAC（Super Real Application Cluster）的技术架构与核心创新，通过行业测评成果及标杆案例，验证了国产多写多读共享存储集群产品的技术可行性与实践价值。并从产品能力提升和行业拓展等维度展望了 UXDB SRAC 的未来方向。

关键词：共享存储集群；多写多读；缓存融合；Oracle RAC；UXDB SRAC；Cache Fusion；全局事务控制

一 引言

1.1 数据库市场趋势与高端集群战略价值

数据库管理系统是数字经济的核心基础设施。2025 年 12 月，Gartner 发布《Forecast: Database Management Systems, Worldwide, 2023-2029》报告称，全球 DBMS 市场预计在 2026 年增长 18.4%，达到 1610 亿美元，^[1]。这一增长的核心驱动力包括：数据量的爆炸式增长、工作负载的激增、人工智能技术的广泛采用，以及云原生架构的快速扩张。

在全球数据库市场中，关系型数据库管理系统仍占据主体地位，约占总市场规模的 62%^[2]。而该领域内，具备高可用集群能力——特别是多写多读共享存储集群能力的数据库产品，构成了一个高度集中、

技术壁垒极高的细分市场。这些集群数据库主要部署于金融核心交易、电信计费、能源调度等对系统连续性和数据一致性有极端要求的关键业务场景。由于这些场景对数据库的可用性通常要求达到 99.999% 以上，且不允许任何形式的数据丢失或事务不一致，集群数据库的技术门槛和客户黏性远高于一般数据库产品。

从行业趋势来看，Forrester Research 在其 2024 年发布的《The Forrester Wave: Translytical Data Platforms, Q4 2024》中指出，现代企业对数据库的需求正在从“单场景专用”向“多场景融合”演进——事务型和分析型工作负载的边界日益模糊，数据库平台需要同时支撑实时事务处理和即时分析决策^[3]。在这一趋势下，具备多写多读共享存储能力的数据库集群，因其能够在一个逻辑统一的数据库中同时承载高并发写入和复杂分析查询，具有天然的技术优势。

据 IDC 发布的《中国金融行业集中式关系型数据库市场份额，2024》报告，2024 年中国金融行业集中式事务型数据库市场规模已突破 11.6 亿元人民币，且增速显著^[4]。在这个高度专业化、技术壁垒极高的细分市场中，传统的国际厂商（以 Oracle RAC 为代表）占据主导地位。然而，在信创政策的持续推进下，国产数据库在这一高端市场的渗透率正在加速提升。IDC 报告指出，金融行业数据库的国产化替代正在从非核心系统向核心交易系统纵深推进——这是数据库替代中难度最高、风险最大、但价值也最为显著的环节。

1.2 集中式共享存储架构的不可替代性

在数据库技术领域，“集中式”与“分布式”的路线之争已持续多年。以 Google Spanner、CockroachDB 等为代表的分布式数据库方案，在互联网公司的海

量用户数据存储等场景中展现了水平扩展的优势。然而，在金融核心交易、电信计费、能源调度等对强一致性和低延迟有极端要求的场景中，集中式共享存储架构具有不可替代的技术优势^[5]。

从数据一致性角度看，集中式共享存储架构基于单一数据副本（逻辑上为单一数据视图），天然消除了分布式系统中因数据分片和副本复制带来的数据一致性问题。在分布式数据库中，跨节点事务的一致性需要通过 Paxos/Raft 共识协议或两阶段提交来保证，每次网络往返都会引入额外延迟。正如 CAP 定理的提出者 Eric Brewer 在 2012 年的回顾文章中所指出的，一致性和延迟之间存在精细的权衡关系^[6]。对于银行核心交易系统而言，一笔跨账户的资金划转涉及借方的扣减和贷方的增加，必须在原子性上得到绝对保证——在网络分区发生时，分布式一致性协议可能长时间阻塞或被迫放弃一致性，这在金融场景中是不可接受的^[7]。

从高可用性角度看，集中式共享存储架构的故障恢复能力远超主备复制方案。主备架构存在固有的“数据丢失窗口”——主节点提交事务后，在备节点完成同步前若发生故障，已提交事务的数据将永久丢失。而在多写多读共享存储集群中，由于所有节点共享同一份数据文件和事务日志，任意节点的故障都不会导致已提交事务的数据丢失，真正实现 RPO=0（零数据丢失）和 RTO<10 秒的极致可用性。这种级别的故障自愈能力，对于银行支付清算等容不得丝毫中断的关键业务而言，是不可妥协的底线要求^[8]。

从应用兼容性角度看，集中式共享存储集群对外呈现为单一逻辑数据库实例，应用层无需进行任何改造即可享受多节点集群带来的高可用和高性能优势。这对于拥有大量存量业务系统的金融、政务等行业尤为重要——这些系统中嵌入了大量的 PL/SQL 存

储过程、触发器和复杂 SQL 查询，迁移到分布式数据库通常需要大规模的应用重构。共享存储集群的设计哲学是：集群的复杂性由数据库内核承担，而非转嫁给上层应用——这一理念是被 Oracle RAC 二十余年全球实践所充分验证的最佳范式^[9]。

从运维复杂度来看，集中式共享存储集群虽然在底层实现极为复杂，但其对外暴露的管理界面相对简洁——DBA 管理的仍是逻辑上统一的数据库，而非数十个甚至上百个分布式节点。在 DBA 人力成本日益攀升的背景下，这一运维优势不容忽视。

从性能可预测性的角度看，共享存储集群的所有节点看到的是同一份完整数据，查询优化器无需考虑数据分片的影响，性能表现更加稳定和可预测。分布式数据库存在“性能悬崖”效应——如果查询能够被下推到单个分片执行，性能很好；但如果需要跨分片聚合数据，性能可能急剧下降。这种不确定性对于要求严格 SLA 保障的关键业务系统而言是难以接受的。

1.3 Oracle RAC 行业地位与国产化紧迫性

如果要评选过去二十余年中对全球数据库产业影响最为深远的技术产品，Oracle Real Application Clusters（RAC）无疑位居榜首。自 2001 年 Oracle 9i RAC 首次引入 Cache Fusion 技术以来，RAC 凭借其多节点共享存储、全对称读写、透明故障切换等一系列能力，在全球关键业务系统中建立了近乎垄断的市场地位^[10]。虽然 Oracle 不公开披露 RAC 的实际部署数量，但业界普遍估计全球有超过 20 万个生产环境运行着 Oracle RAC。

在中国市场，Oracle RAC 的影响力尤为显著。据行业不完全统计，中国大型商业银行一度超过 90% 的核心交易系统运行在 Oracle RAC 之上，三大电信

运营商的计费系统和运营支撑系统大部分采用 RAC 架构，能源央企的调度系统和 ERP 系统同样深度依赖 RAC^[11]。

此外，随着国际形势的变化，关键技术的供应链安全成为各国关注的焦点。Oracle 作为美国企业，其产品受到美国出口管制法规（EAR）的约束——2019 年华为被列入“实体清单”后，包括 Oracle 在内的多家美国科技企业中止与华为的合作；这类事件充分表明：在核心技术上的对外依赖，本质是战略脆弱性^[12]。

从商业成本角度看，Oracle RAC 的许可费用和维护成本极为高昂。一套典型的 4 节点 RAC 集群，加上 Data Guard 灾备、Partitioning 分区选项等附加选项，5 年总拥有成本（TCO）往往超过数千万元人民币。此外，Oracle RAC “技术锁定”效应——专用集群软件（Grid Infrastructure）、专用存储管理（ASM）、专用监控工具（OEM）等使得整个 IT 基础设施深度绑定 Oracle 生态，形成“技术→产品→人才”的三重锁定。

基于以上考量，中国近年来大力推进数据库国产化替代战略。2025 年国务院国资委发布的相关政策文件明确提出，到 2027 年央企国企需实现信创国产化替代的明确目标。这一政策在数据库领域意味着：在未来两年内，大量央企和国有企业需要将其核心业务系统的数据库从 Oracle RAC 迁移到国产数据库^[13]。据业内估算，仅央企和国企的 Oracle RAC 存量系统就超过 5 万套。这对国产数据库厂商提出了前所未有的要求——不仅要有过硬的产品，更要有成熟的迁移工具链和丰富的项目实施经验。

尽管如此，我们必须清醒地认识到，平替绝非易事。Oracle RAC 经过二十余年持续演进和全球数十万生产环境的打磨，其技术成熟度和生态完善性已臻极

高水准。国产数据库要在核心业务场景中真正替代 Oracle RAC，必须在技术架构上实现与之对等的的能力：全对称多写多读、缓存融合（Cache Fusion）、全局事务强一致性、秒级故障恢复和透明应用兼容。在这些要求中，任何一项的缺失都可能导致替代方案在关键场景中的“降级使用”——即从核心业务退回到非核心业务。

1.4 多写多读共享存储技术，数据库工程“天花板”

在数据库技术的复杂度谱系中，多写多读共享存储集群（Shared-Disk Multi-Writer Cluster）被公认为最具技术挑战性的架构形态。全球范围内，全面攻克其核心技术难题并成功产品化的团队屈指可数。

这一架构必须同时解决以下核心技术难题：

第一，缓存融合（Cache Fusion）：在多个节点拥有独立内存缓冲区的情况下，如何在节点间高速、一致地共享数据缓存，确保任一节点对数据的修改能够被其他节点即时感知，同时将节点间通信开销控制在可接受范围内^[14]。

第二，全局事务并发控制：在多节点并发执行读写操作的情况下，如何保证全局事务的 ACID 特性，特别是隔离性和一致性——包括高效的全局锁管理、跨节点 MVCC、全局死锁检测等经典难题。

第三，共享存储文件系统缓存一致性：多个节点如何协调对共享存储中同一组数据文件的并发读写？文件系统元数据如何在节点间保持一致？这需要从文件系统层面提供集群级别的强一致性保障。

第四，高可用与故障自愈：如何在部分节点故障时实现秒级服务恢复和强一致性？如何可靠地检测和裁决脑裂（Split-Brain）？故障节点重新加入集群时如何高效完成实例恢复？

第五，日志管理与恢复：每个节点拥有独立的重做日志，但所有节点的日志必须能在故障恢复时被全局合并，以还原一致状态。这一过程的工程复杂度极高。

正是由于这些技术难题的极高门槛，全球范围内能够真正实现全对称多写多读共享存储集群的数据库产品极少——Oracle RAC 是其中的集大成者，经过二十余年演进达到业界标杆水平。对于中国数据库产业而言，攻克这一“技术天花板”既是国产替代战略的刚性需求，也是向世界证明中国数据库技术实力的标志性战役。优炫数据库 UXDB SRAC 正是在这样的时代背景下，经过不断的技术积累和持续攻关，从底层内核出发，系统性完成了内存管理、事务并发控制、锁管理、日志恢复和文件系统等核心模块的集群化重构，成为极少数在这一领域取得实质性突破的数据库产品。

【本章小结】全球数据库市场持续高速增长，其中高端集群数据库构成了技术壁垒最高的细分市场。集中式共享存储架构在强一致性、高可用性和应用兼容性方面具备不可替代的优势。Oracle RAC 在中国关键信息基础设施中的深度应用，加之国际形势变化带来的供应链风险，使得国产数据库集群产品的研发具有战略紧迫性。接下来的章节将系统梳理这一技术的演进历程，并深入解析 UXDB SRAC 的技术架构和实践成果。

二 共享存储集群技术在学术与产业的演进

2.1 共享存储架构的理论基础

共享存储集群架构的理论根基可追溯到上世纪八十年代分布式系统研究的黄金时期。计算机科学家们

开始系统性地探索如何利用多处理器和多节点架构来突破单机数据库系统的性能和可用性瓶颈。

20 世纪 80 年代，David DeWitt 及其团队在威斯康星大学麦迪逊分校开展了 GAMMA 数据库机项目。该项目于 1986 年在 VLDB 会议上发表了开创性论文，成为并行数据库研究的重要里程碑。GAMMA 项目在包含多个处理器和共享磁盘阵列的硬件平台上，首次系统地探索了共享存储环境下的数据库并行处理技术。项目的重要发现包括：通过合理的数据分区和负载均衡策略，可实现近似线性的查询处理加速比；共享存储架构天然适合混合事务/分析处理工作负载；单个处理器节点的故障不会导致系统崩溃。这些发现为后来的商业产品奠定了理论基础^[15]。

在经典的分布式系统分类学中，数据库集群架构通常分为三类，由数据库先驱 Michael Stonebraker 在 1986 年系统阐述^[5]：

无共享（Shared-Nothing）架构：每个节点拥有独立的处理器、内存和存储，节点间通过网络交换数据。代表产品包括 Teradata 及当今大多数分布式 NewSQL 数据库。其理论优势在于几乎无限的横向扩展能力，但跨节点分布式事务的一致性保障成本随节点数增长而急剧上升。

共享磁盘（Shared-Disk）架构：所有节点共享同一个存储子系统，但各自拥有独立内存。Oracle RAC、IBM Db2 pureScale 及 UXDB SRAC 均属此类别。其核心优势在于：所有节点看到同一份完整数据，从根本上避免数据分片和迁移问题；通过缓存融合技术，节点间可高效共享热点数据，大幅减少磁盘 IO。

共享内存（Shared-Memory）架构：所有处理器共享同一物理内存和存储，典型如 SMP 服务器。

事务处理效率最高，但扩展性受限于单台服务器的物理上限。

在以上三种架构中，共享磁盘架构因其在强一致性和高可用性方面的独特优势，成为关键业务系统数据库集群的主流选择^[16]。共享磁盘架构的性能瓶颈在于"所有权转移"（Ownership Transfer）——当多个节点并发访问同一数据块时，需要通过"乒乓效应"在节点间传递数据块所有权。缓解这一瓶颈的手段包括：应用层"数据亲和性"设计、数据库内核"动态资源重分配"（DRM），以及持续进步的高速互联网络（InfiniBand、RDMA over Converged Ethernet 等）。

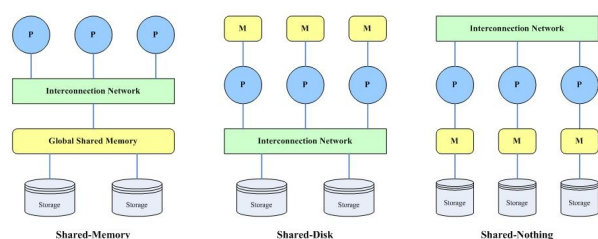


图 1：三种数据库集群示意架构对比图

2.2 Oracle RAC 技术演进与历史贡献

Oracle RAC 的历史可追溯到 1987 年 Oracle 推出的 Oracle Parallel Server（OPS）——最早尝试在多台服务器上运行单一数据库的商业产品。但早期的 OPS 采用基于磁盘的"乒乓缓存"机制，每一次写操作都会引发两次磁盘 IO，性能堪忧^[17]。

真正的革命性突破发生在 2001 年。在以 Roger Bamford（罗杰·班德福）为核心的技术团队领导下，Oracle 在 VLDB 2001 会议上发表了里程碑论文《Cache Fusion: Extending Shared-Disk Clusters with Shared Caches》，首次系统阐述了缓存融合技术^[10]。缓存融合的核心思想是：当节点 A 需要读取正被节点 B 持有的数据块时，不再通过磁盘传递，而是通

过集群私有高速网络直接将数据块从节点 B 的内存传输到节点 A 的内存。这一机制将数据块传输延迟从毫秒级（磁盘 IO）降低到微秒级（网络传输），实现了 2-3 个数量级的性能提升。

Roger Bamford 及其团队的工作堪称数据库工程史上的典范。他们不仅解决了"多节点共享内存一致性"这一核心理论问题，还将其工程化为一个在数万个生产环境中稳定运行二十余年的商业产品。Cache Fusion 不是一项单一技术，而是一个复杂的技术体系——包括全局缓存服务（GCS）、全局锁服务（GES）、全局资源目录（GRD）以及高性能集群互联协议等一整套子系统。Bamford 的技术领导力在于：他不仅定义了整体架构，还带领团队在几乎所有关键子系统上都实现了最优的工程方案。

从技术演进看，Oracle RAC 经历了几个关键阶段：Oracle 9i RAC（2001）首次引入 Cache Fusion；Oracle 10g RAC（2003）引入 ASM 自动存储管理和动态资源重分配（DRM）；Oracle 11g RAC（2007）显著优化了 Cache Fusion 在高冲突场景下的效率；Oracle 12c/18c/19c RAC（2013-2019）引入 Application Continuity 和多租户架构；Oracle 21c/23ai RAC（2021-2024）引入区块链表、JSON 关系二元性和 AI Vector Search 等现代化能力^[18]。

从高可用体系看，Oracle 构建了 Oracle MAA（Maximum Availability Architecture）最高可用性架构，以业务连续性保障为核心目标，通过 Bronze 到 Platinum 四级 SLA 架构，将 RAC+TAF（Transparent Application Failover）透明应用故障转移实现本地实例秒级切换、ASM 提供磁盘组冗余与镜像，消除存储单点故障；Data Guard 保障异地零数据丢失容灾、GoldenGate 支撑跨平台双活连续运行；OEM 统一监控平台状态并自动触发告警；Flashback 分钟级回退人为误操作、RMAN 作为最

终备份兜底，结合 Application Continuity 自动重放事务、滚动升级零停机维护及 GDS 全局流量路由，使技术高可用能力逐层转化为“业务不中断”的连续性保障。

Oracle RAC 的成功不仅源于技术架构的先进性，更在于 Oracle 投入巨量资源进行产品质量打磨和生态建设。其“开箱即用”的产品体验——应用 SQL 代码无需修改即可在 RAC 环境中运行、故障切换对最终用户近乎透明——看似简单，实则需要数千个技术细节的精湛处理。这也是优炫数据库集群产品持续追赶的方向。

表 1：Oracle RAC 关键版本与技术里程碑

版本	发布时间	技术创新	行业影响
Oracle 9i RAC	2001	Cache Fusion（缓存融合）技术	告别传统磁盘锁，开创共享存储数据库集群新纪元
Oracle 10g RAC	2003	ASM（自动存储管理）、CRS（集群同步服务）与 DRM（动态资源重分配）	实现存储与集群组件的标准化合，大幅降低运维复杂度
Oracle 11g RAC	2007	Grid Infrastructure (GI)、SCAN（单客户端访问名）与 Flex ASM	统一集群与存储底层，奠定“网格计算”与敏捷扩展架构
Oracle 12c RAC	2013	Application Continuity (AC)、Flex Cluster（弹性集群）与 CD/PDB 多租户支持	实现应用层透明故障无感切换，支持超大规模集群弹性伸缩
Oracle 19c RAC	2019	Zero-Downtime GI 补丁、自动事务排空与本地临时表空间	确立企业级零中断运维与高可用基准
Oracle 23ai RAC	2024	RAC 节点级 Vector Search 协同、真正应用集群优先（TAC）与智能诊	赋予 RAC 集群高性能 AI 向量检索能力与智能化高可用保

2.3 IBM Db2 pureScale 的并行实践

在多写多读共享存储集群领域，IBM Db2 pureScale 是另一个重要的技术实践。2009 年，IBM 基于大型主机（System z）上经过数十年验证的 Parallel Sysplex 技术，在开放平台上推出了 Db2 pureScale^[19]。

pureScale 的技术架构特点鲜明：它采用集中式锁管理和集群缓存设施（CF），而非 Oracle RAC 的分布式锁管理；利用 Db2 的数据共享组机制，允许多个成员共享同一组表空间；基于 RDMA 技术的超低延迟节点间通信——在 InfiniBand 互联下，4KB 数据页的 RDMA 传输延迟可控制在数微秒级别^[20]。

然而，Db2 pureScale 市场表现相对逊色，主要原因：
1. pureScale 的用户群体先天受限；对 IBM Power 硬件生态的深度绑定限制了部署灵活性；2. IBM 在数据库业务上的战略投入在 2010 年代后期有所收缩。尽管如此，pureScale 在技术架构上的创新——特别是基于 RDMA 的高效节点间通信和集中式锁管理+双工 CF 的高可用设计——为共享存储集群技术提供了宝贵的工程参考。

2.4 PostgreSQL 社区的集群探索

作为全球最活跃的开源关系型数据库，PostgreSQL 社区在过去二十年中涌现了大量的集群和高可用方案。这些方案代表了开源社区在这一方向上的积极探索，但与 Oracle RAC 级别的全对称多写多读架构存在本质差距。方案包括：

Postgres-XC/XL 采用了 Shared-Nothing 架构，由协调器、数据节点和全局事务管理器三层构成，是开

源社区最具雄心的多主集群尝试^[21]。但这两个项目在 2018 年前后基本停止了开发。

Patroni + etcd + PostgreSQL 流复制是当前最流行的高可用方案组合，通过流复制实现主备同步、通过 etcd 实现自动选主和故障切换。但这一方案本质上是主备架构的增强版——任何时候只有一个节点可接受写入^[22]，限制了性能提升，架构增加了存储成本，并且数据冲突管理与运维困难，数据一致性遇到挑战。

Citus 通过将 PostgreSQL 转化为分布式数据库，在分析型负载中表现出色，但跨分片查询的性能有天然瓶颈^[23]。

PostgreSQL 社区的集群探索深刻反映了一个现实：在没有内核级改造的情况下，要基于单主架构的 PostgreSQL 实现真正的全对称多写多读共享存储集群，几乎是不可能完成的任务。多写多读集群所需的缓存融合、全局锁管理、全局事务控制等核心能力，必须从数据库内核层面进行系统性重构——包括进程模型、内存管理、锁管理器、事务管理等几乎所有核心子系统。开源社区的碎片化和缺乏持续商业投入的特点，使得这一级别的技术难以在纯社区模式下实现。

2.5 国内外学术前沿研究

在学术领域，共享存储多主数据库系统一直是数据库研究的热点方向。近年来值得关注的前沿研究包括：

Amazon Aurora 多主集群是产业界最引人注目的尝试之一。Aurora 的核心设计理念是“日志即数据库”——计算节点负责生成 REDO 日志和处理查询，存储节点负责日志持久化和数据页生成。Multi-Master 允许多个读写节点同时提供写入服务，通过

基于数据页版本号的乐观并发控制来检测冲突^[24]。然而，乐观并发控制在低冲突场景下性能优异，但在高冲突场景下事务回滚和重试问题较难克服。

华东师范大学数据库团队自 2020 年起，以基于页面所有权标记的缓存融合机制为起点，围绕共享缓存多写架构持续研究，构建基于 PostgreSQL 内核 PG-RAC 系统，该系统采用共享缓冲池和分布式缓存一致性协议，在软件层面支持多节点对同一存储卷的并发读写。^[25]

清华大学数据库团队在多主架构方向取得了标志性成果。其发表于 PVLDB 2024 的工作^[26]制，并作为金融级 TPC-C 负载下验证了线性扩展能力。

中国人民大学数据库团队在多写集群并发控制理论方面聚焦四个方向：Chimera 提出基于页面所有权预转移的缓存融合优化，将跨节点页面传输频次降至最低，吞吐量提升最高达 19 倍^[27]；D3C 将确定性并发控制引入共享存储场景，消除了分布式提交的阻塞等待^[28]；HDCC 针对异构写负载设计了混合一致性协议^[29]；TxnSails 则从正确性验证角度提出了事务隔离性的黑盒检测方法^[30]。其中 Chimera 已开源，为后续研究提供了可复现的实验平台。

2.6 国产数据库的相关行业实践

过去十年，国产数据库行业在标准与产业方面取得了长足进步。在行业标准建设方面，2024 年 3 月，中国电子产业标准化技术协会发布 T/CESA 1324—2024《共享存储数据库集群技术规范》提出了共享存储数据库集群的结构组成，规定了共享存储数据库集群的通用功能、高可用性、可扩展性、运维管理、应用开发适配、软硬件兼容性、安全和性能的技术要求，提出了测试方法。2026 年 1 月，中国信通院就《基于共享存储架构的数据库技术要求》核

心能力框架达成一致意见。需要注意的是，上述对基于共享存储数据库集群产品的技术要求并未限定在多写多读架构模式。

在产业界方面，在多写多读共享存储集群这一领域上，国内已有多家厂商开展相关技术攻关，在节点规模、故障恢复和事务一致性等维度取得了不同程度的突破。

优炫全对称多写多读共享存储数据库集群 UXDB SRAC 在 2019 年 6 月北京展览馆软博会上正式发布，同年荣获 IT168 主办的年度技术卓越奖。2023 年 8 月，优炫多写多读共享存储数据库集群新版在 DTCC 大会发布，同年通过中国电子学会组织的国家级科技成果鉴定，鉴定称：“该成果技术复杂，研制难度大，创新性强，关键技术指标达到国际先进水平。”并荣获“中国电子学会科技进步三等奖”，其多项技术创新得到权威专家认可。2026 年 6 月，产品通过中国信通院“基于共享存储架构的数据库基础能力”可信数据库产品全项测试。

阿里云 PolarDB-MP 将解耦共享内存与共享存储，在其共享内存之上构建了融合服务器（PMFS），包含通过分布式 TSO 与去中心化内存访问保障事务顺序与 MVCC 可见性的 Transaction Fusion、基于分布式共享缓冲区实现节点间数据页 Push/Fetch 的 Buffer Fusion，以及将行锁信息直接嵌入行数据以降低锁协调开销的 Lock Fusion；同时，引入逻辑日志序列号（LLSN）为多节点日志建立偏序关系，以按顺序重放日志并进行崩溃恢复。^[31]

华为 GaussDB 采用“计算-内存-存储”三层解耦架构以支持资源独立扩展；其内存层无状态，可从计算节点状态重建，负责维护全局页面所有权目录（POD）、全局锁及温数据缓存；在路由方面，系统采用基于图划分与多层感知机（MLP）预测的智

能路由算法，将查询路由至具备相关数据页面的计算节点，以降低跨节点传输开销；在故障恢复上，结合了内存与存储两级检查点，并在传输页面所有权时于原节点保留历史镜像。^[32]

openGauss 社区于 2026 年 3 月发布 oGRAC 7.0.0-RC3 多主数据库创新版本，采用存算分离架构，实现计算、内存、存储三层池化，具备全局分布式缓存、分布式 MVCC 等关键技术，支持集群多读多写能力，提供强一致和高可用能力。

此外，达梦、崖山等厂商也推出了各自的共享存储数据库集群产品和高可用解决方案，且已通过行业测评，得到行业认可。

目前，各数据库厂商的共享存储集群（RAC）产品已逐步在金融、能源、交通、政务等关键行业核心系统中广泛落地。如：优炫 UXDB SRAC 在高端科技、能源领域取得突破；阿里、华为在云数据库以及金融等关键领域取得突破，openGauss oGRAC 在运营商等场景中开始落地验证。整体来看，国产多写多读共享存储数据库集群产品处于从“能用”迈向“好用”初级阶段，并在多个关键行业具备了规模化国产化替代能力。

信创政策为国产数据库提供了历史性的战略机遇，而核心业务系统对数据库集群能力的刚性需求，驱动着国产厂商持续加大研发投入。在此背景下，优炫数据库管理与研发团队多年来持续坚持战略定力、持续投入攻关 UXDB SRAC 多写多读共享存储集群的核心技术，在集群事务处理、存储引擎优化和高可用保障等关键方向取得了重大突破。

优炫数据库 UXDB SRAC 自研全对称多写多读架构、共享存储文件系统和缓存融合等核心技术，在架构层面高度接近 Oracle RAC 的技术范式。相较于其它技术方案，其技术差异化特征体现在：全对称架

构实现集群节点完全对等，消除了单点写入瓶颈，提供了高并发下的线性扩展能力；按需恢复机制确保在硬件或软件故障时，系统无需停机即可完成恢复，保障了业务的持续可用性；自研文件系统则从底层块设备到上层文件接口实现了全链路自主开发，使得每一层的性能都可控、可优化。以及信通院 8 节点 39 项指标全面通过的实际验证^[33]。

【本章小结】多写多读共享存储集群的技术演进史，是一部从学术探索到产业实践的攀登史。从 1980 年代的 GAMMA 项目，到 2001 年 Oracle RAC 的 Cache Fusion 革命，再到 2025 年中国数据库在学术与产业前沿的最新突破，这一技术始终处于数据库技术的最前沿。开源社区的积极探索和国产数据库的奋力追赶，共同构成了这一领域的活跃生态。在下一章中，我们将聚焦 UXDB SRAC，深度解析其技术架构与创新。

三 UXDB SRAC 技术架构

3.1 路线选择：多写多读共享存储的必然

在启动优炫数据库集群研发项目的初始阶段，技术团队面临一个根本性的战略抉择：要实现高端集群能力，应该走哪条技术路线？当时市场上主要存在三种技术方案：中间件模拟方案、分布式数据库方案和多写多读共享存储方案^[34]。

中间件模拟方案——通过在数据库和应用程序之间插入代理中间件分发 SQL 请求。其优势在于实施门槛低、开发周期短，但在事务一致性、性能瓶颈和应用兼容性方面存在天然缺陷。特别是对于跨节点的分布式事务，中间件只能依赖 XA 协议或最终一致性方案，难以满足核心业务场景的强一致性要求。

分布式数据库方案——通过 Paxos/Raft 共识协议实现多副本一致性，在水平扩展方面具有优势。但在银行核心交易、电信计费等场景中面临几个无法回避的挑战：分布式事务的性能代价——每次跨分片写入至少需要两次网络往返；数据一致性的保障成本——N 副本意味着 N 倍存储开销；应用兼容性问题——存量业务系统的大规模重构；以及运维复杂度随节点数呈指数级增长。

多写多读共享存储方案——是三者中技术难度最高的路径。它需要从数据库内核层面进行系统性重构——包括进程模型、内存管理、锁管理器、事务管理器、WAL 日志管理等核心模块。在集群环境下引入分布式缓存一致性、全局锁管理、全局事务协调等概念后，复杂度至少增加数倍。但这是实现 Oracle RAC 等价替代的唯一技术路径——唯有全对称多写多读共享存储集群，才能在不改造应用的前提下，提供与 Oracle RAC 对等的高可用、强一致和高性能能力。

正如 Oracle RAC 的设计哲学所示：集群的复杂性应该由数据库内核来承担，而非转嫁给上层应用。这一“内核消化复杂性”的架构哲学，是共享存储集群能够大规模推广的关键所在^[9]。

3.2 全对称多写多读架构概览

UXDB SRAC（Super Real Application Cluster，超级实时应用集群）是优炫数据库的企业级多写多读共享存储集群解决方案。其核心架构特征可概括为：
1. 全对称——集群中不存在主从之分，每一个节点都是对等的；
2. 多写多读——所有节点都可接受应用的读写请求并操作全量数据；
3. 高可用——任意节点故障时，剩余节点在秒级时间内自动接管，RPO=0。

在物理部署层面，UXDB SRAC 的架构包含五个层次：

共享存储层：所有 UXDB SRAC 节点通过光纤通道（FC）或 iSCSI 协议连接到同一套存储区域网络（SAN），共享同一套数据文件、控制文件和日志文件。共享存储推荐采用全闪存阵列（NVMe SSD）以提供极低的 IO 延迟。在存储层之上，UXDB SRAC 运行自研的共享文件系统，负责管理共享存储上的文件元数据同步和磁盘空间分配。

数据库实例层：每个节点运行一个完整的 UXDB 数据库实例，拥有独立的重做日志（WAL）和共享内存缓冲区。各实例之间通过专用的高速私有网络进行缓存融合和锁管理通信。每个实例的缓冲区中缓存的数据页对所有节点而言都是可以获取到最新版本的——这是通过缓存融合（Cache Fusion）技术实现的。

集群互联层：通过专用的高速网络（推荐 InfiniBand RDMA 或 RoCE），各节点之间进行三类主要通信：缓存融合模块数据页传输、全局锁管理消息、事务状态消息和心跳消息。无状态数据块传输策略使得数据页传输延迟控制在微秒级别，同时大幅降低网络开销。

集群管理层：集群管理组件（Cluster Resource Manager, CRM）负责节点注册、心跳检测、故障裁决和成员关系维护。CRM 通过三层防护体系（心跳检测→故障裁决→按需恢复）保障集群持续高可用运行。

应用接入层：通过统一智能接入点（SCAN IP），应用连接请求被智能分发到集群内的各数据库实例。负载均衡器支持多种分发策略，包括轮询、最小连接数和自定义策略等。

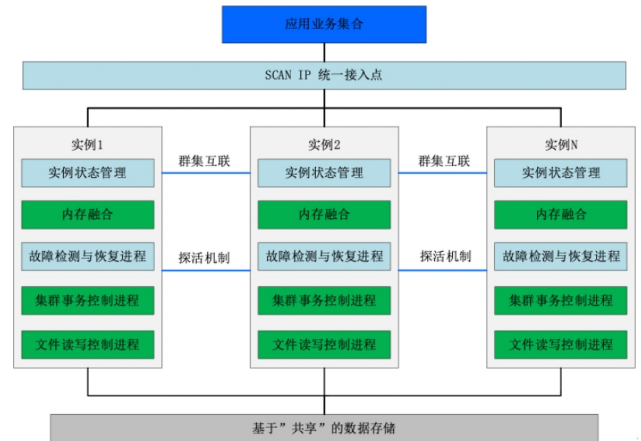


图 2: UXDB SRAC 数据库集群架构总览

表 2: UXDB SRAC 架构说明

架构层次	核心组件	关键功能
应用接入层	SCAN IP/智能负载均衡器	统一接入、智能分发、故障自动漂移
数据库实例层	UXDB 实例 x N	全对称架构、独立内存缓冲、独立 WAL 日志
集群互联层	高速私有网络 (RDMA/万兆)	数据块传输、事务状态、锁消息、心跳通信
集群管理层	CRM（心跳/裁决/成员管理）	节点管理、故障检测、成员维护
共享存储层	SAN 全闪存 + 自研文件系统	共享数据文件、自研文件系统、元数据同步

3.3 核心子系统技术解读

3.3.1 缓存融合（Cache Fusion）

缓存融合是 UXDB SRAC 架构中最核心、技术难度最高的子系统。其设计目标是：使集群内所有节点的共享内存缓冲区在逻辑上融合为一个统一的全局缓存。任一节点对数据页的修改能够被其他节点在极低延迟内感知和获取，从而在保证数据一致性的前提下最大化减少磁盘 IO^[14]。

UXDB SRAC 的缓存融合建立在全局缓存服务（Global Cache Service, GCS）之上。GCS 的核心职责包括：一是资源主控管理——每个数据块在集群中有一个主控节点，负责维护该数据块的全局状态（记录哪些节点持有读锁或写锁）；二是锁授权与降级——当节点 B 需要访问正被节点 A 持有的数据页时，GCS 负责协调锁的授权和降级；三是数据块转发——支持直传（从持有节点网络直接传输）和存储读取（冷数据从共享存储读取）两种模式。

一个典型的缓存融合数据流（节点 A 需要读取节点 B 持有的数据页 X）如下：节点 A 的 Backend 检查本地缓存未命中；向数据页 X 的主控节点 GCS 发送读锁请求；GCS 通知节点 B 将 X 的最新版本通过高速内网发送给 A，并将 B 持有的写锁降级为读锁；节点 B 通过高速内网将数据页直接写入节点 A 的缓冲区——整个过程无需磁盘 IO，延迟控制在极低水平。GCS 的核心使命是尽可能使数据块传输走"直传模式"——在运行良好的集群中，绝大多数数据块请求应通过直传满足。

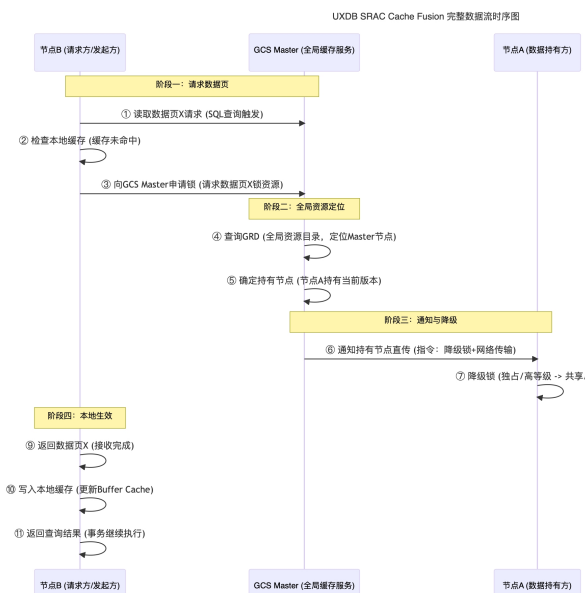


图 3：缓存融合数据流示意图

3.3.2 全局事务并发控制

在缓存融合的基础上，UXDB SRAC 构建了全对称集群事务控制体系，将单机数据库的 ACID 特性完整地扩展到集群层面。

全局事务管理器为每个事务分配一个全局唯一的事务 ID（GXID），通过实例组合方式保证在整个集群范围内的唯一性。BOC（Broadcast On Commit）同步机制是 UXDB SRAC 实现集群事务一致性的核心创新——事务提交的状态数据通过广播机制在极低延迟内通知集群中所有其他节点，确保所有节点对事务提交状态有完全一致的认知。

UXDB SRAC 采用多版本并发控制（MVCC）作为基础并发控制机制。写操作不直接覆盖原有数据行，而是创建新版本——旧版本保留在回滚段中。读操作不需要获取读锁，只需根据事务开始时的快照看到在该时间点之前已提交的数据行版本。在集群环境下，MVCC 的核心挑战是"快照一致性"——节点 A 上的只读事务需要看到所有在它开始之前已提交事务的修改。UXDB SRAC 通过 BOC 广播机制和全局 GXID 顺序来保证跨节点快照一致性。

全局锁管理（Global Enqueue Service, GES）实现了分布式锁管理器，负责在集群范围内协调数据库对象级别的锁。当节点上的 Backend 需要对某张表加锁时，GES 负责检查集群中是否有其他节点持有冲突的锁，若无冲突则授权，有冲突则进入等待队列。全局死锁检测服务通过构建跨节点的等待图，使用深度循环检测所有节点等待图，一旦发现死锁自动终止代价最小的那个事务。

表 3：UXDB SRAC 全局事务控制机制总览

控制机制	技术实现	保障目标
全局事务标识	节点 ID + 本地序列	集群范围内事务唯

	号的 GXID	一标识
MVCC 多版本控制	写创建新版本 + 读基于快照	读写互不阻塞，高并发 OLTP
BOC 广播提交	事务提交元数据广播至所有节点	跨节点事务提交状态即时一致
全局锁管理（GES）	分布式锁管理器，多种锁级别	跨节点数据访问的并发控制
全局死锁检测	跨节点等待图 + 检测	自动检测并解除分布式死锁

3.3.3 共享存储文件系统

在多写多读共享存储集群中，文件系统承担着关键角色——支持多个节点对共享存储中同一组数据文件的并发读写，并保证文件元数据在节点间的强一致性。

在技术选型初期，研发团队系统评估了四种方案：直接 IO 方案（实现简单但无法实时扩展文件大小）、GFS2 集群文件系统（存在锁粒度过粗和内核 Bug 不可控的问题）、NFS 网络文件系统（存在单点性能瓶颈和可靠性问题），以及自研块设备文件系统方案。综合评估后，自研方案在底层依赖 Linux 内核中经过验证的稳定模块（Block_dev 层），在功能上可针对数据库场景深度优化，在可靠性上拥有自主可控的代码质量和 Bug 修复周期——是最优选择。

文件系统的架构设计遵循“分层解耦”原则，分为客户端和服务端两大模块。客户端以库的形式提供给 UXDB 数据库进程调用，向上提供符合 POSIX 语义的文件操作接口——从数据库引擎的角度看，就像一个普通的本地文件系统。服务端包含底层读写层（Block Layer）和基础库层（Utility Layer），实现了数据块管理、extent 树映射、元数据缓存同步和 POSIX 文件 API 语义维护等核心功能。

文件系统的全局锁机制主要保护文件系统元数据的一致性——包括超级块、inode 位图、数据块位图、目录项和索引块等。锁策略遵循“最小范围锁定”原则：当两个节点分别向不同的文件追加数据时，需锁定的资源仅为各自文件的 inode 和索引块，不会锁定整个文件系统级别的全局元数据。资源标识通过一致性哈希算法分配到管理节点，确保同一资源的所有锁请求总是到达同一管理节点，实现锁管理的一致性。

3.3.4 集群管理与故障恢复

UXDB SRAC 的集群管理组件（CRM）设计了三层防护体系，从故障检测到服务恢复层层递进。

第一层——心跳检测：通过网络心跳和磁盘心跳双重机制监控每个节点的健康状态。网络心跳每秒一次通过私有高速网络发送，磁盘心跳向共享存储上的心跳区写入状态信息。双重心跳机制是共享存储集群相比纯网络方案的独特优势，支撑集群出现脑裂场景后可做出的正确裁决。

第二层——故障裁决：当心跳检测发现节点疑似故障时，CRM 通过磁盘心跳和备用网络路径交叉验证节点的真实存活状态，避免“误杀”；若确认故障，基于多数派原则进行裁决——与超过半数的其他节点无法通信的节点被正式裁决为故障节点。被裁决驱逐的故障节点，其 IO 路径被立即阻断（IO Fencing），防止向共享存储写入脏数据。

第三层——在线恢复：从剩余存活节点中选择一个执行故障节点的数据恢复。在线恢复的核心是集群日志排序算法——将集群故障节点的 WAL 日志按照全局事务提交顺序进行排序和拼接，构建全局一致的重做日志流后从最近的检查点重放。在重放过程中，剩余节点正常对外提供服务。

表 4：UXDB SRAC 故障恢复三层防护体系

防护层次	核心机制	技术指标
心跳检测	网络心跳+磁盘心跳双重机制	检测周期 1s，3 次超时触发
故障裁决	交叉验证+多数派原则+IO Fencing	裁决完成<3s，防脑裂写入
在线恢复	多写日志合并+全局一致重放	恢复期间其他节点正常服务

3.4 性能特征与技术验证

2026 年 6 月，UXDB SRAC 通过了中国信息通信研究院"可信数据库"产品测试，UXDB SRAC 以全部 39 项技术指标的圆满成绩通过基于共享存储架构的数据库基础能力的测评^[33]。

测评围绕五大能力维度展开：

共享存储协同要求：测试覆盖了存储协议兼容性、多节点数据一致性（写-写并发正确性、读-写并发正确性、分布式死锁检测）、在线弹性扩展（2→4→8 节点不中断业务扩容）、共享事务日志管理、多节点透明多写（SCAN IP 负载均衡偏差<10%）等核心场景。

基本功能：验证了 8 节点集群配置、统一集群运维视图、连接负载均衡、存储参数动态调整、数据库对象在线扩展等基础运维能力。

高可用与容灾：验证了任意时间点恢复（PITR）、多种故障模式下（节点断电、网络闪断、OS Kernel Panic 等）的自动故障检测与切换，以及存储冗余保护。

兼容适配能力：验证了标准 SQL 接口适配、国产芯片平台适配（鲲鹏、飞腾、海光、兆芯）、国产操作系统适配（麒麟、统信、欧拉），以及多编程语言接口支持。

安全能力：验证了三级权限模型、多租户隔离、国密算法全链路加密（SM2/SM3/SM4）、动态数据脱敏和不可篡改安全审计。

测评的一个重要细节是：本次测评采用 8 节点集群部署，这意味着 UXDB SRAC 的 8 节点全对称多写多读能力通过了第三方权威机构验证^[33]。

【本章小结】UXDB SRAC 选择了多写多读共享存储这一"难而正确"的技术路线。UXDB SRAC 在缓存融合、全局事务控制、自研文件系统和集群高可用管理等核心子系统中均实现了自主技术突破。信通院 2026 年 39 项指标全面通过的测评结果，为 UXDB SRAC 的技术实力提供了权威验证。在下一章中，我们将聚焦 UXDB SRAC 在关键行业场景中的实践成效与准备。

四 优炫数据的行业实践与准备

数据库产品的最终价值在于真实业务场景中的可靠运行。本章首先呈现 UXDB SRAC 的标杆实践案例——某国家级科研院仿真平台，随后分析能源调度场景的技术实践，最后综述 UXDB SRAC 在金融、电信和政务行业的技术能力储备与部署信心。

4.1 科研仿真：极端条件下的能力验证

4.1.1 项目背景

某国家级科研院所承担复杂环境下的仿真任务，需实时计算并管理海量实体的状态数据。仿真场景的核心需求是：高频更新能够被实时持久化；多个计算节点基于完全一致的数据视图进行推演计算；在任意服务器硬件故障场景下，仿真任务中断为秒级。原有数据库架构基于传统主备模式，面临三个无法逾越的瓶颈：写入吞吐不足——单节点写入能力仅

为 30-50MB/s，远低于仿真所需的持续写入速率，成为整个仿真流程的瓶颈；故障恢复慢——主备切换时间通常为数分钟，而仿真中断后需从头开始，导致数小时工作损失；数据一致性与延迟——原有异步复制方案存在毫秒甚至秒级的数据同步延迟，导致不同计算节点数据视图不一致，推演结果失真。

4.1.2 技术挑战与部署方案

平台对数据库提出了极为严苛的技术指标：写入吞吐——稳定持续约百 MB/秒；故障恢复本地 RTO < 5 秒，RPO = 0；百万级查询响应 ≤ 0.1 秒；年可用性在 99.999% 以上。

项目组经过较长周期的全面技术选型，对比了多种方案后选择 UXDB SRAC 集群。核心考量是：UXDB SRAC 的多写多读共享存储架构使 4 个节点共享同一份数据文件，所有节点同时提供读写服务，写入负载均匀分发至各节点。部署方案为：UXDB SRAC（国产服务器、飞腾处理器）连接全闪存 SAN 共享存储；私有高速 RDMA 网络用于缓存融合和心跳通信；SCAN IP 智能负载均衡；另配置 1 个异地异步备库用于灾难恢复。

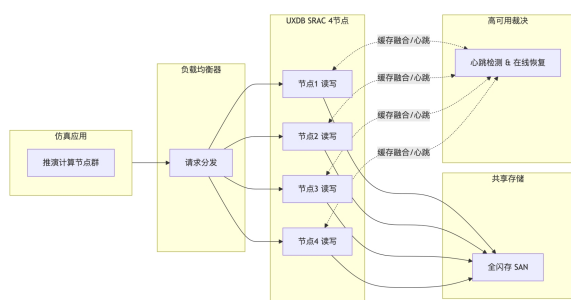


图 4：该平台 UXDB SRAC 部署架构图

4.1.3 运行成效

该案例集中体现了 UXDB SRAC 在高要求仿真场景中的核心能力：其多写多读共享存储架构使所有节

点同时读写、吞吐线性扩展，从而突破单点写入瓶颈；缓存融合与全局事务机制消除数据延迟，实现真正强一致性；心跳裁决与在线恢复支撑秒级故障自愈，RTO 小于 5 秒，达到金融级可用性；同时，国产化自主可控的特性使其在关键领域成功替代国外同类集群产品，满足安全与战略要求。

4.2 能源调度：大规模持续运行的保障

能源行业的核心调度系统是典型的关键信息基础设施，其运行稳定性直接关系到国家能源安全。以智能电网调度系统为例，该系统需要实时采集和处理来自全国数十万个测点的遥测遥信数据，构成典型的高频写入+实时查询混合工作负载^[35]。

SCADA（数据采集与监控系统）对底层数据库提出了四项核心要求：高频写入——数以万计的远程终端单元以秒级频率持续上传遥测数据；实时查询与决策——调度员需实时查看电网状态并在异常发生时秒级响应；在线扩容——数据规模持续增长，数据库必须支持不中断业务的在线扩展；灾备与恢复——必须建立可靠的灾备机制确保极端灾害下的数据安全。

在能源调度场景中，UXDB SRAC 通过多节点并行写入支撑大规模时序数据的持续写入。在 4 节点配置下，实测能够支撑每秒超过 50 万个数据采样点的持续写入和存储。UXDB SRAC 的强一致性保障确保所有节点的查询结果反映同一时刻的电网状态快照——调度中心多个操作台展示的数据必须完全一致，任何不一致都可能影响调度决策的正确性。UXDB SRAC 支持在线添加节点和在线扩容存储空间，满足电网规模持续增长的需求。

在能源行业的实际测试中，UXDB SRAC 的稳定性经受住了考验。以某省级电网公司的智能调度系统

为例，UXDB SRAC 集群在数据写入吞吐和典型调度查询响应时间方面均表现出色，测试期间集群未发生任何计划外宕机。这一测试充分证明了 UXDB SRAC 在能源调度场景中的技术可靠性和业务承载能力。

4.3 金融核心交易：能力准备与技术信心

金融行业是对数据库要求最为严苛的行业。在银行核心交易、证券交易撮合、支付清算等场景中，每一笔业务都涉及资金的原子性流转——任何数据不一致都可能导致资金差错，进而引发严重的监管后果和声誉损失^[36]。

核心交易系统对数据库的技术要求可归纳为三个“零容忍”：**数据差错零容忍**——任何已提交的事务必须被持久化且不可丢失，任何并发事务的执行结果必须等价于某种串行执行顺序；**服务中断零容忍**——银行核心系统通常要求 7×24 小时不间断运行，年可用性不低于 99.999%；**性能抖动零容忍**——交易延迟必须保持稳定可预测，不可预测的性能抖动直接影响客户体验和业务效率。

在传统的两地主备架构下，银行核心系统面临的挑战是“数据丢失窗口”。即使在同步复制模式下，主库在提交事务后、备库完成同步前的短暂时间窗口内若发生故障，数据仍可能丢失。而 UXDB SRAC 的共享存储集群架构从根本上消除了这一风险——由于所有节点共享同一份数据和日志，任何已提交事务的数据都立即对所有节点可见和可用。

UXDB SRAC 针对金融行业的部署已形成完整的“两地三中心”参考架构：同城双数据中心各部署多个节点组成生产集群（通过裸光纤互联），共享全闪存 SAN 存储；异地灾备中心部署异步备库，以最大保护模式运行，确保极端灾难下保有完整的异

地数据副本。这一架构与 Oracle RAC + Data Guard 的经典高可用方案在拓扑结构上完全对等，但全部基于国产软硬件实现，满足金融信创合规要求和等保 2.0 标准^[37]。

UXDB SRAC 在金融行业的推广采取“由外到内、由浅到深”的渐进推进策略：先在非核心辅助系统部署，积累运维经验和性能数据；再推广至准核心系统，经过充分的运行验证后，逐步推进至核心交易系统——通过与现有系统的并行运行和结果交叉比对，确保核心系统替换的平稳过渡。这一策略已经在若干金融机构的实践中有序推进，技术准备已臻充分。

4.4 电信运营支撑：能力储备与场景适配

电信运营商的核心系统——特别是计费系统和运营支撑系统（OSS/BSS）——对数据库的写入吞吐和并发处理能力有极高的要求。在话务高峰期，每秒钟需要处理数千条呼叫详细记录（CDR），每条 CDR 对应一次账户余额查询、余额扣减和计费流水记录——合计上万次数据库操作每秒^[38]。

UXDB SRAC 的多写多读能力天然适配电信场景的需求：多个节点可并行处理计费请求，将写入负载均匀分散到集群各节点。全对称多写架构使每个节点独立处理计费请求，不会因单一节点的 CPU 或锁资源瓶颈而限制整体吞吐量。全局事务并发控制在处理热点行（如预付费账户余额的并发扣减）时，确保余额扣减的原子性和精确性。在线滚动升级能力支持在“零停机”条件下完成版本更新。

UXDB SRAC 在电信行业的布局策略聚焦于：先通过省级运营商计费系统的试点部署验证多节点写入和实时余额管理的核心能力；在性能和稳定性得到充分验证后，再向更大规模的集团级核心系统推广。

当前，UXDB SRAC 在电信场景的技术验证和适配工作已取得积极进展，团队对该领域的高要求场景部署充满信心。

4.5 政务与公共安全：替代合规能力支撑

政务信息化和公共安全是信创替代的主战场。根据信创政策要求，政府部门和国有企业的电子政务系统、公共安全系统、行政审批系统等存量数据库正在加速向国产数据库迁移。UXDB SRAC 在这一领域的核心优势体现在几个方面：

完整的信创生态适配——从鲲鹏/飞腾/海光/兆芯等国产芯片，到麒麟/统信/欧拉等国产操作系统，UXDB SRAC 已完成了主流信创平台的全面适配和深度优化。这不仅意味着“能够运行”，而是针对各平台的硬件特性进行了指令级优化和内存管理调优，确保在国产硬件平台上充分发挥性能。

高比例 Oracle 兼容性降低迁移成本——UXDB SRAC 支持的 Oracle 兼容语法（包括 PL/SQL 存储过程、触发器、包、序列等）使得大量存量 PL/SQL 业务逻辑可实现高比例直接迁移。这一兼容能力在多个省级政务平台的实际迁移评估中已被验证，显著降低了迁移风险和时间成本。

高可用保障政府服务连续性——政务系统停机不仅影响效率，更可能引发负面社会舆论。UXDB SRAC 的 RPO=0 和同城 RTO<10 秒的高可用保障，使得电子政务系统可在任意硬件故障下实现无缝业务切换，确保政务服务的持续兑现。

值得一提的是，UXDB SRAC 提供了完整的迁移工具体系：包括 Oracle 到 UXDB 的自动迁移评估工具、数据全量+增量在线迁移工具，以及 SQL 兼容性测试框架。这套工具体系在多个省级政务平台的

实践中显著降低了迁移风险和周期——将典型政务系统的数据库迁移周期从传统方案大幅缩短。

在政务信创替代的大趋势下，UXDB SRAC 已经做好了从技术、产品到工具、服务的全方位准备，有信心在接下来的信创推进高潮中发挥关键作用。

表 5：UXDB SRAC 五大行业能力矩阵

行业领域	核心需求	SRAC 能力	状态
高端科技	极高写入吞吐+数据绝对一致+极速故障恢复	4 节点约百 MB/s 写入+MVCC 一致性+秒级自愈	标杆案例验证
能源调度	高频持续写入+实时查询+在线扩容	50 万采样点/秒写入+快照一致性+在线扩展	对比测试验证
金融核心	零数据差错+99.999% 可用性+强一致性	RPO=0 RTO<10 秒 +ACID 保障	+ 能力储备就绪
电信计费	海量 CDR 处理+热点行并发+零停机升级	多写分散负载+行锁精确扣减+滚动升级	场景适配就绪
政务信创	平滑迁移+信创适配+高可用保障	98% 兼容迁移+全栈适配+秒级切换	工具链就绪

【本章小结】从仿真平台高吞吐持续写入和全年零数据歧义的标杆实践，到能源调度高频数据采集的稳定验证，再到金融、电信、政务领域全面就绪的技术能力和渐进推进策略——UXDB SRAC 以求实的态度和量化的成果，展示了产品承载关键业务系统的技术实力和市场准备。

五 技术展望与行业拓展

站在当前技术节点回望，UXDB SRAC 走过了从技术攻关到产品化落地的完整历程。展望未来，

UXDB SRAC 的技术演进将紧密围绕实际业务需求展开，在持续巩固现有能力的基础上，有计划、有重点地推进技术创新。

5.1 持续提升集群能力

UXDB SRAC 将持续优化集群核心能力，重点方向包括：

资源迁移算法优化：在多写多读共享存储集群中，不同的数据库实例会并发处理来自不同业务模块的请求，由于业务流量天然存在波动和局部聚集性，集群经常面临节点间负载极度不均衡与资源争用倾斜的痛点。本产品将建设一套动态、平滑的跨节点资源迁移机制，在集群出现算力倾斜或数据块锁争用时，能够自动、无感知地将热点数据和控制权调度到更合适的节点上，在平衡集群负载的同时，降低运行中的业务系统抖动。

故障处理与备份恢复能力增强：在多写多读共享存储架构下，由于物理介质共享且写入源头分散，传统的单机备份方式在面对多节点并发写入时，极易导致备份数据出现物理“时间撕裂”和逻辑破损。本产品将增强多写多读架构下的故障事务清理、全局一致性备份以及高可靠恢复功能，在不影响多节点并发写入的前提下，提供物理完全一致的整机备份，并在遭遇故障或需要回滚时，能够确保多节点 WAL 日志流的时序精准对齐与数据无损恢复。

可观测性提升：集群由于多节点管理割裂、状态交织，其部署、升级和监控的复杂度远超单机数据库，运维人员长期面临集群整体状态不可见、瓶颈难定位的痛点。本产品将进一步增强集群的图形化管理与全链路观测系统，开发集群图形监控、性能监控与 AWF（自适应工作负载框架），将各分散节点

的状态、跨节点网络开销以及会话等待事件进行集中、可视化的统一呈现，彻底消除运维盲区。

5.2 行业市场拓展

随着信创替代进入关键冲刺期，UXDB SRAC 将重点聚焦以下市场方向：

金融行业的深度推进——通过“先周边、后核心”的渐进策略，在充分积累运行经验和用户信心的基础上，逐步向核心交易系统迈进。同时拓展证券、保险、基金等细分行业的数据库国产化项目。

电信与能源的规模复制——三大电信运营商和能源巨头拥有大量的存量集群数据库系统，是 UXDB SRAC 最大的潜在市场。UXDB SRAC 将持续深化与行业头部客户的技术合作，通过试点项目验证、形成行业解决方案、实现规模推广。

高端领域的持续深化——在标杆案例的基础上，进一步深化在此领域的技术积累，提升产品在更加多样化的极端条件下的适应能力。UXDB SRAC 在当前国产芯片和操作系统平台上的原生适配优势，是满足该领域“全自主可控”要求的核心支撑。

政务信创的加速落地——随着各省市信创工程的全面展开，政务系统的数据库国产化替代将进入实施高峰期。UXDB SRAC 在 Oracle 兼容迁移和信创生态适配方面已做好充分准备，将加速在省级和市级政务平台中的部署。

在国际市场方面，UXDB SRAC 着眼于长远发展，将依托国际合作框架，探索海外推广机会。这些新兴市场同样面临着与数据库供应链安全和成本相关的挑战，具备 Oracle RAC 对标能力的国产数据库产品具有一定的差异化竞争力。

六 结语

多写多读共享存储集群技术是数据库工程领域最具挑战性的技术高峰之一。从 1980 年代的学术探索，到 2001 年 Oracle RAC 引入 Cache Fusion 革命，再到当前国际学术界的持续创新——这一技术的演进史清晰地表明：真正伟大的技术产品是长期主义、极致工程和持续迭代的结晶。

在中国信创战略深入推进的时代背景下，UXDB SRAC 的研发与落地，标志着国产数据库在共享存储集群这一核心领域取得了实质性突破。通过全对称多写多读架构、自主缓存融合、自研文件系统和全局事务控制等核心技术的攻关，UXDB SRAC 已经具备了承载关键业务系统的技术能力。以及高端科技、能源等行业标杆案例的成功实践，为 UXDB SRAC 的技术影响力提供了坚实支撑。

我们再次向以 Michael Stonebraker 教授、以 Tom Lane 和 Bruce Momjian 等先驱为核心的 PostgreSQL 全球开发组织及代码贡献者致敬，是他们数十年来用无私的开源精神、严苛的匠心标准和极致的架构追求，铸就了先进的数据库基石；向以 Roger Bamford 为代表 Oracle RAC 的那一代数据库工程师表达敬意。他们定义了多写多读共享存储集群的技术范式，并将其转化为改变了世界数据管理方式的产品；向中国数据库领域的前辈、同行和客户致敬，正是通过他们在数据库领域不懈的努力为优炫数据库 UXDB 提供了新的思考与共同进步的可能。

数据库产品的成功是一场马拉松——不仅需要持续的技术研发投入，还需要客户信任的长期积累、生态系统的持续繁荣和品牌信誉的逐步建立。优炫数据库团队愿与您一道，以更加开放的品格、坚韧的

技术和安心的选择，助力客户业务的长期稳健运行和对时代变化的敏捷响应。

参考文献

- [1]. Gartner, "Forecast: Database Management Systems, Worldwide, 2023-2029," Gartner Research, December 2025.
- [2]. Gartner, "Market Share: Database Management Systems, Worldwide, 2024," Gartner Research, June 2025.
- [3]. Forrester Research, "The Forrester Wave: Translytical Data Platforms, Q4 2024," December 2024.
- [4]. IDC, 《中国金融行业集中式关系型数据库市场份额，2024》，IDC 中国, 2025 年 7 月.
- [5]. M. Stonebraker, "The Case for Shared Nothing," IEEE Database Engineering Bulletin, Vol. 9, No. 1, pp. 4-9, 1986.
- [6]. E. Brewer, "CAP Twelve Years Later: How the Rules Have Changed," IEEE Computer, Vol. 45, No. 2, pp. 23-29, 2012.
- [7]. P. Bernstein, V. Hadzilacos, N. Goodman, "Concurrency Control and Recovery in Database Systems," Addison-Wesley, 1987.
- [8]. Oracle Corporation, "Oracle Real Application Clusters Administration and Deployment Guide 23ai," Oracle Documentation, 2025.
- [9]. Oracle Corporation, "Oracle Database 23ai: Maximum Availability Architecture," Oracle White Paper, 2025.
- [10]. T. Lahiri, V. Srihari, W. Chan, "Cache Fusion: Extending Shared-Disk Clusters with Shared Caches," Proceedings of VLDB 2001, Rome, Italy, pp. 683-686, 2001.
- [11]. IDC, 《中国关系型数据库软件市场追踪报告，2024》，IDC 中国, 2025 年.
- [12]. U.S. Department of Commerce, Bureau of Industry and Security, "Entity List," 15 CFR Part 744, Supplement No. 4, 2019.

- [13]. 国务院国有资产监督管理委员会, 关于加快推进国有企业信息技术应用创新的相关政策文件, 2025 年.
- [14]. Oracle Corporation, "Cache Fusion and Global Cache Service in Oracle Real Application Clusters," Oracle Technical White Paper, 2023.
- [15]. D. DeWitt et al., "The GAMMA Database Machine Project," IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 44-62, 1990.
- [16]. Oracle Corporation, "Oracle RAC Performance Tuning Guide: Understanding Cache Fusion Dynamics," 2024.
- [17]. Oracle Corporation, "Oracle8 Parallel Server: Concepts and Administration," Oracle Documentation, Part No. A58238-01, 1997.
- [18]. Oracle Corporation, "Oracle Database 23ai: New Features Guide," Oracle Documentation, 2024.
- [19]. IBM Corporation, "IBM DB2 pureScale: Technical Overview," IBM Redbooks, SG24-7897-00, 2010.
- [20]. IBM Corporation, "DB2 11.5: pureScale Feature," IBM Knowledge Center, 2024.
- [21]. Postgres-XL Project, "Postgres-XL: Scalable Open Source PostgreSQL-based Database Cluster," GitHub Repository, 2018.
- [22]. A. Kukushkin et al., "Patroni: A Template for PostgreSQL High Availability," GitHub, 2025.
- [23]. Citus Data (Microsoft), "Citus: Distributed PostgreSQL for Multi-Tenant SaaS and Real-Time Analytics," 2025.
- [24]. A. Verbitski et al., "Amazon Aurora: Design Considerations for High Throughput Cloud-Native Relational Databases," Proceedings of SIGMOD 2017, pp. 1041-1052.
- [25]. 华东师范大学. PG-RAC: 基于 PostgreSQL 的共享缓存多写集群系统[J]. 软件学报, 2025.
- [26]. Li G, et al. GaussDB: A multi-primary shared-storage database architecture[C]. Proc. of PVLDB, 2024.
- [27]. Lu W, Du X, et al. Chimera: Efficient page ownership transfer for shared-storage multi-primary databases[C]. Proc. of PVLDB, 2025.
- [28]. Lu W, Du X, et al. D3C: Deterministic concurrency control for shared-disk clusters[J]. IEEE TKDE, 2024.
- [29]. Lu W, Du X, et al. HDCC: Heterogeneous-aware distributed concurrency control[C]. Proc. of ICDE, 2023.
- [30]. Lu W, Du X, et al. TxnSails: Black-box isolation testing for multi-primary databases[C]. Proc. of SIGMOD, 2024.
- [31]. Xinjun Yang et al., "PolarDB-MP: A Multi-Primary Cloud-Native Database via Disaggregated Shared Memory," Proceedings of SIGMOD 2024.
- [32]. Guoliang Li et al., "GaussDB: A Cloud-Native Multi-Primary Database with Compute-Memory-Storage Disaggregation," Proceedings of VLDB 2024.
- [33]. 中国信息通信研究院, 《可信数据库: 共享存储架构数据库基础能力测评报告》, 2026 年 6 月.
- [34]. L. Lamport, "Paxos Made Simple," ACM SIGACT News, Vol. 32, No. 4, pp. 51-58, 2001.
- [35]. 国家电网有限公司, 《智能电网调度控制系统(D5000)技术规范》, Q/GDW 11680-2023, 2023 年.
- [36]. 中国工商银行金融科技研究院, 《银行核心系统数据库技术选型白皮书》, 2024 年.
- [37]. 中国人民银行, 《金融行业信息系统信息安全等级保护实施指引》, JR/T 0071-2024, 2024 年.
- [38]. 工业和信息化部, 《电信业务支撑系统技术规范》, 2024 年.



关于优炫数据

优炫数据（股票代码：430208）成立于 2009 年，国家高新技术企业。作为企业级数据库产品与解决方案提供商，公司稳居国产数据库市场头部阵营，拥有 30 余项专利并参与多项国家标准制定。

核心产品优炫数据库（UXDB），融合多写多读共享存储、分布式 OLAP、多模态融合及 AI 就绪等技术，为企业关键业务构建高可用、多场景、智能化的坚实数据底座。

公司以北京、西安、成都三大研发中心为依托，秉持“数据库+人工智能”战略，提供从规划到运维的全栈服务，致力于帮助客户安全合规地挖掘数据价值，激发业务创新，是产业数字化浪潮中值得信赖的长期伙伴。

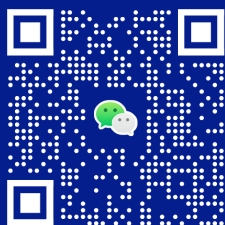
联系我们

如需详细信息，请通过以下方式联系我们

product@uxsino.com

如需加技术交流群，联系微信：Siberia18

扫码获取更多信息



本白皮书版权归北京优炫数据库股份有限公司所有，未经书面许可不得复制。书中所述产品规划、技术展望及架构设计等，均基于当前现状，仅供参考，不构成任何服务承诺或适用性保证。第三方商标、数据及企业等信息来源为公开渠道，优炫数据已尽力核实，但不保证其准确性、完整性与实时性，相关表述不代表官方评价或第三方背书，读者需自行核实并承担相应风险。