



北京金融科技产业联盟
BEIJING FINTECH INDUSTRY ALLIANCE

金融行业开放平台数据库转型 白皮书

北京金融科技产业联盟

2023年11月

版权声明

本报告版权属于北京金融科技产业联盟，并受法律保护。
转载、编摘或利用其他方式使用本白皮书文字或观点的，应注
明来源。违反上述声明者，将被追究相关法律责任。



编制委员会

主任：

聂丽琴 刘承岩

编委会成员：

黄本涛 王 辉（工行）

编写组成员：

董勇明 史大鹏 李 林 庄乾锋 董 里 赵 耀 庞 毅

陈伟红 郭凤鸣 谢 军 白 阳 徐 旭 王 辉（华夏）

杨 勳 徐雅光 韩竺吾 李 倩 毛思平 王莉莉 郑皓广

王鹏冲 李中原 王嵩阳 李 斌 娄贺展

编审：

林承军 张 蕾

参编单位：

北京金融科技产业联盟

中国工商银行股份有限公司

华为技术有限公司

中国农业银行股份有限公司

中国银行股份有限公司

中国建设银行股份有限公司

中国光大银行股份有限公司

华夏银行股份有限公司

兴业银行股份有限公司

平安银行股份有限公司

摘 要

“十四五”规划提出了“加快数字化发展”的总体布局，金融服务是支撑数字经济发展的关键要素，同时自身也有数字化转型的发展诉求。金融开放平台数据库作为金融信息系统的核心基础软件，转型升级对于突破金融效率瓶颈、释放金融创新空间、提升金融服务水平、支撑金融行业数字化转型和高质量发展具有重要而深远的意义。

在开放平台数据库转型中，面临着技术选型难、系统迁移难，综合风险提升等诸多挑战。本文通过调研金融行业开放平台数据库技术应用现状、分析金融行业数据库架构转型中的重点和难点应用场景、并结合开放平台业务系统关系型数据库的应用转型实践，提出转型解决思路和建议。文中述及的方案以数据库的集中式+分布式双栈架构，满足金融业不同的业务场景需求：对于稳态业务，采用集中式部署，满足快速原地平替的转型需求，对于敏态业务，采用分布式部署架构，满足系统快速弹性扩缩容的需求。

数据库转型是一项复杂的系统性工程，本文对多个关键技术领域，包括同城双集群容灾、对象迁移、数据迁移、数据校验、测试验证、并行方案等都进行了深入的阐述和分析，给出了整体技术方案建议和实践案例，可为金融同业及相关领域从业者提供参考。

目 录

一、 金融行业开放平台数据库现状调研及转型思路	1
(一) 金融行业开放平台数据库部署情况	1
(二) 传统数据库在金融行业应用的架构及能力	4
(三) 数据库转型挑战	6
(四) 转型目标和总体思路	8
二、 金融典型业务数据库需求及选型建议	10
(一) 金融典型业务数据库需求	10
(二) 国产数据库技术路线分析	12
(三) 数据库架构选型建议	19
三、 开放平台数据库转型方法	24
(一) 方案规划设计	24
(二) 数据库迁移	31
(三) 投产运行	34
四、 数据库转型实践	38
(一) 现状	38
(二) 挑战	38
(三) 转型实践	41
(四) 转型效果	48
五、 金融行业应用数据库转型未来展望	49
(一) 云原生数据库各类技术路线相互融合	49
(二) 金融行业数据库技术应用的建议	57
参考文献	60

一、金融开放平台数据库现状调研及转型思路

（一）金融行业开放平台数据库部署情况

1. 金融行业数据库技术发展历程

数据库作为金融信息系统的核心基础软件，历经数十年发展，为金融行业经营战略转型升级提供了有力的技术支撑，伴随着金融行业信息系统的演进，经历了不同的发展阶段。

信息化阶段：改革开放后，我国金融行业面对信息技术革命滚滚大潮，积极学习和吸收世界金融行业技术革新成果，告别了手工记账时代，开启电子化、信息化建设进程，带来了金融行业工作方式和业务处理的巨大变革。

数据集中阶段：金融体制改革不断深化，开始推动金融系统向纵向统筹管控发展，金融行业走向数据大集中的发展道路。工行、农行、中行、建行等国有大行于世纪之交率先开启集中式金融信息系统技术体系建设，宣告中国大型金融机构步入集约化经营时代。这一时期，商用集中式数据库以其高效的数据存取效率、优异的系统稳定性，很好地契合了金融行业对数据存储管理的需求，为金融行业实现信息集中统计处理、财务集中改革、风险集中控制、业务集中管理等奠定了坚实的技术基础。

互联网金融阶段：金融行业出现电子银行、电子支付等新业态，相比线下转账等传统金融交易场景，业务场景和业务量都有了显著提升，金融行业开放平台技术体系相应的涌现出多种不同的数据库产品，有效实现金融服务的降本增效和创新发展。互联网金融的异军突起，促进了基于开源数据库的金融级解决方案发展与成熟，在互联网领域具备较多应用案例的开源数据库也逐步引入金融行业。金融行业吸收业界数据库技术应用的成功经验，并结合金融交易场景推陈出新，不断扩展开放平台数据库在金融行业的应用范围，有力支撑金融行业向信息化转型。

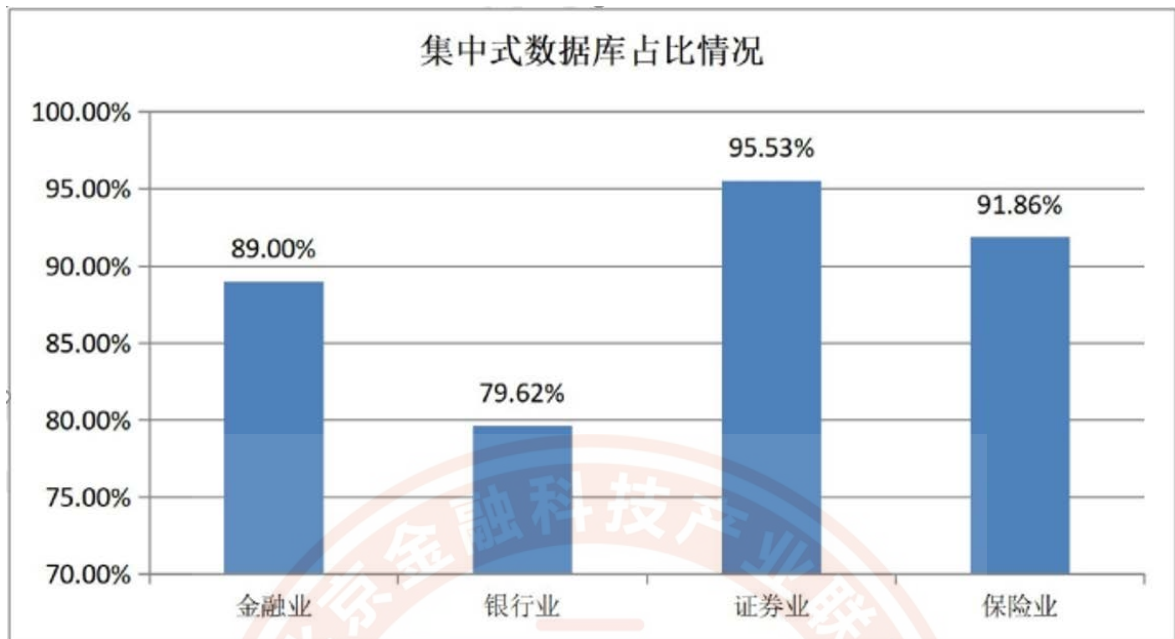
数字化转型阶段：在这个阶段，两类关键需求正在驱动数据库技术发展演进。一方面，随着数字化转型深入，以及疫情影响，加速了手机银行、手机支付的使用，处理超高峰值、海量数据成为关键需求特征；另一方面，随着金融行业技术创新应用的深入，数据库如何保证金融信息系统更好，更稳定地运行，提升系统韧性，支撑金融业务创新成了新课题。各金融机构纷纷围绕这两类需求开展了数据库架构转型工作，探索各种新型国产数据库产品在金融应用场景试点和落地案例，同时也涌现出众多与各类新的软硬件平台相适配的分布式数据库产品。

2. 金融行业数据库应用现状

集中式数据库成熟稳定：传统商业集中式数据库以其较强的功能黏性、优秀的系统稳定性、良好的软硬适配能力，目前在金融行业的存量应用仍占据较大的份额。而国产数据库和MySQL、PostgreSQL等开源数据库近些年逐渐从金融外围系统向金融核心业务延伸。

分布式数据库广泛试点：为应对数字化转型带来的高并发、海量数据、超高峰值等挑战，以及传统商业数据库迁移的难题，近年来各金融机构都在探索数据库转型的多种技术路线及推广，分布式数据库在金融行业应用规模已经有明显提升。

传统集中式数据库占比高：虽然分布式数据库应用不断增加，但集中式数据库应用仍占据主要份额。据金融信息化研究所《金融业数据库供应链安全发展报告》（2022）的数据显示，集中式数据库应用在金融业整体占比接近90%，其中银行业占比接近80%，证券业和保险业占比均超过90%。金融业集中式数据库占比情况示意图1。



数据来源：金融信息化研究所

图 1 金融业集中式数据库占比情况示意图

(二) 传统数据库在金融行业应用的架构及能力

1. 传统数据库高可用架构

传统数据库高可用架构完备：可以满足金融客户不同灾备等级、灾备部署及相关 RPO 和 RTO 要求。如 Oracle 数据库提供的高可用容灾方案包括 RAC、ADG 和存储复制等技术，该方案采用基于 FC-SAN 外置存储的存算分离架构，底层以共享存储

(Shared Storage) 的模式对接企业级存储盘机保证数据的高可靠，计算层部署多个无状态 Oracle 实例 (RAC)，通过缓存融合技术 (Cache Fusion) 实现计算实例多读多写。本地高可用基于 RAC 实现故障快速切换，实现 RPO=0，RTO 秒级，同城通

过 ADG (ActiveDataGuard) 进行数据同步, 通过集中存储磁盘复制同步日志确保同城故障切换时数据完整性, 实现 RPO=0, RT0=10—30 分钟。高可用架构示意图 2。

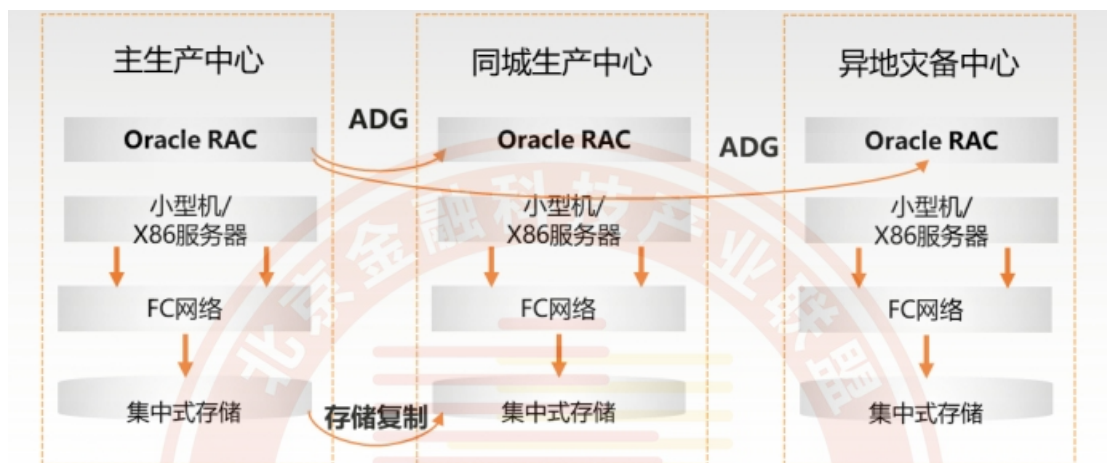


图 2 Oracle 高可用架构示意图

目前传统数据库的成熟度高, 在金融行业应用广泛, 内核稳定, 各类技术方案经过充分生产验证, 具备完善的高可用容灾及配套工具和监报告警等运维体系。

2. 传统数据库主要能力

传统数据库功能强、特性多。传统数据库由多个组件组成, 除了在数据库的使用上有相对统一的 SQL 标准以及 ODBC、JDBC 规范外, 其他组件并没有规定如何实现。比如数据字典、存储组织、并发控制、事务机制、会话管理、权限管理、持久化等方面, 每个数据库的设计和实现并不相同。每个数据库系

统基于不同设计理念和实现，在系统规格上一般也有较大的差异。

以 ORACLE 数据库为例，在金融行业使用的主要能力如数据库表、索引、存储过程、序列、视图、触发器、自定义类型等数据库对象和高级包函数、自治事务、递归调用、自连接等复杂特性。

（三）数据库转型挑战

系统性工程：数据库转型是一项系统性工程，金融机构在长达数十年的使用过程中，部署了相当规模的传统数据库，并在其上耦合开发了大量应用，积累了相关软硬件规划、上线、调优、监控、运维、变更等能力，例如由传统 Oracle 数据库、Redhat 操作系统、IBM 大小机、X86 服务器、FC-SAN 存储及其网络等构成的典型的技术堆栈，亟需形成一套系统的数据库架构转型方案体系进行转型替换，端到端指引每一步的转型工作，确保“飞机空中更换发动机”之后生产平稳运行。

技术选型难：目前在国内政策和国际环境的双重作用下，国产数据库百花齐放，起步较早的国产数据库厂商已经在稳定性和性能有很大提升，并在金融、政府等重要行业得到验证，但总体上仍有差距。面对如此众多的数据库厂商（200+国产数据库厂商）及其技术发展路线和部署架构，金融行业亟需解决

如何进行数据库的选型。

迁移过程难：除了面临数据库选型难的问题，开放平台迁移还要考虑解决以下三个核心问题：

一是可用性问题，如何保证系统的高可用、高可靠及容灾能力。存量的开放平台传统应用往往具有历史比较久远、业务长期稳定、关联应用较多等特点，随着金融业务的持续创新，数据库转型也在不断实现底层系统架构的演进和迭代，必须充分考虑数据库的本地、同城、异地系统的可用性、可靠性及容灾设计，有效控制风险并持续优化，保障迁移过程应用服务平稳运行。

二是功能及性能问题，如何解决传统数据库以及构建在其上的应用同构功能与性能体验。传统应用与数据库高度耦合的优势在于减少了系统组件之间的交互开销，对性能通常有较高要求，架构转型需在满足业务性能指标要求的同时，做到性能体验不下降。同时，需要关注传统数据库功能的平替能力，一方面具备传统数据库功能的平替能力，另一方面能够对平替后功能进行系统验证。

三是平滑安全迁移问题，如何降低整个过程的实施成本并降低风险。完全兼容商业数据库、无需应用层改造的原位替换迁移方案，可以屏蔽数据库特性差异和业务逻辑，有效降低技

术复杂度和转型工作量，适合金融行业规模推广使用。同时，金融机构在数据库迁移过程中需重视目标数据库产品的安全可靠能力及安全等保要求，同时也要保障技术供应链的安全合规和稳定可靠。

（四）转型目标和总体思路

1. 数据库转型目标

开放平台数据库转型目标：具备支撑金融开放平台业务系统稳定运行的能力，支持全业务场景，覆盖关键业务系统、一般业务系统和办公系统，转型后新系统达到“安全有保障，容灾有提升，功能不受损，服务不降级”，整体能力从“可用”转向“好用”。

第一，保证数据库系统安全可靠。金融级数据库的首要目标是生产安全稳定运行，具备7*24小时连续服务能力。转型要保证数据库软硬件系统的整体安全可靠，即使在某些软件故障、硬件异常的情况下，数据库都应保证数据的强一致性及系统的稳定性。数据库存储业务应用的核心数据，任意一笔数据错乱、丢失将带来严重影响，要满足安全等级保护中对数据的机密性、完整性要求。

第二，进一步提升数据库系统的容灾能力。金融级数据库为确保在异常情况下数据不丢失、不错乱，需要具备多地多中

心的容灾及快速恢复能力。可以通过数据库软硬件协同的系统设计，实现系统级的灾备能力及指标提升，例如，数据库双中心容灾 RPO=0，RTO≤2 分钟，异地容灾 RPO≤1 分钟，RTO≤10 分钟等。

第三，目标数据库具备源数据库的功能。金融级数据库经过近二十年应用和演进，已有大量存量数据库部署，需要充分考虑已经开发并部署的应用逻辑，例如存储过程、触发器、函数等特性，通过功能同构的平替能力，提升应用逻辑的兼容性，实现原位替换，简化转型工作量，加快转型节奏。

第四，保持原有数据库系统的服务等级。金融级数据库服务于涉及国计民生的重要业务系统，需要保证转型后用户使用体验的一致性，需要重点关注交易响应时间、并发交易处理能力等核心性能容量指标，并要根据应用发展趋势预测，预留一定的扩容能力。对于大事务、慢 SQL 等异常及时发现并查杀，做到不死可监控，实现 7*24 小时的连续性服务能力。

2. 数据库转型总体思路

开放平台数据库转型面临“时间紧、任务重、难度大”的挑战，本文通过分析多家金融机构的转型实践，总结出了满足开放平台转型要求的选型策略和转型方法。

客观、量化的选型策略：围绕业务场景、技术支撑能力等因素，形成并持续优化数据库选型策略。数据库选型应统筹考虑业务场景的差异及演进，技术路线的架构特点、功能性能、运营运维等因素，避免不同路线造成的技术和业务割裂。

标准化、体系化的转型方法：标准化的转型阶段涵盖方案规划设计、数据库迁移、生产投产等关键阶段，将转型工作有序分解，实现转型方案的快速复制、快速推广；体系化的转型方案涵盖部署方案、容灾方案、迁移方案、测试方案等关键方案，以及配套的操作和指导手册，体系化的方案是转型思路和实践经验的沉淀积累，可以降低转型难度。

数据库转型路径：建议选择先易后难、先简单后复杂，业务改造先外围后核心，先办公系统，后一般业务系统及关键业务系统的路径。

二、金融典型业务数据库需求及选型建议

（一）金融典型业务数据库需求

1. 敏态业务

时效性要求高的业务：高并发且多变的业务场景对数据库的时效性要求越来越高，当业务负载比较大的时候，以秒杀业务为例，高峰时段的业务量是平时业务的十倍左右。为了满足

时效要求，需要数据库却可以快速扩容，满足业务高峰需求，很好地支持业务的快速变化。例如，国有大型商业银行和股份制商业银行的数据库，性能通常要求支持万级 TPS、千级并发连接，单库容量支持数十 TB。

业务流量变化大的业务：大多数传统业务增量相对稳定、容易规划所需要的资源容量，与之不同的是，互联网这类业务随时可能出现流量激增的情况，要求国产数据库具备很强的可扩展性，可以根据业务负载灵活调动资源，随时扩缩容。

2. 稳态业务

可用性要求高的业务：传统业务属性稳定，流程变化少，用户量平缓增长，可用性要求严格。需要以下几种方式来保证核心业务的可用性。一是同集群的故障节点主备切换。在提供高性能的同时保证了系统的高可用性和业务的连续性。二是跨可用区、跨地域部署的容灾能力。三是通过自动的全量增量备份、数据快速恢复、恢复到任意时间点等方式保障多层次备份恢复。

3. HTAP 混合负载应用的业务

由于金融业务发展而带来的复杂多样的业务变化，导致大量不同业务类型的数据存放在一起。例如交互系统和报表系

统，一种是 OLTP 应用场景，一种是 OLAP 应用场景，如果数据存放在一起，就需要数据库既具备事务能力，又需要在分析时具备高效性。需满足用户多类数据存储及在不同业务场景下的处理需求。

（二）国产数据库技术路线分析

根据《墨天轮中国数据库流行度排行》2023年8月发布信息，共有286个数据库参与排名。国产数据库厂商众多，为满足平滑迁移、高可用、高性能等多方面需求往往采用多种架构融合的技术路线，导致主流 OLTP 数据库的架构分类维度众多。如按数据操作的模式可分为集中式和分布式部署，按数据存储方式分为存算一体和存算分离等，同时各种维度又相互交叉。本文以对应用迁移改造影响较大的集中式/分布式部署为主线进行分析，在每大类中再以其他维度分析不同架构的特点为可靠性等选型提供参考。

1. 集中式

集中式部署的共同特点是：数据集中存储，应用访问同一份数据或数据副本。从使用体验上看集中式部署最接近单机数据库，应用看到的数据在逻辑上是可以统一访问的，可以不考虑数据分片、分布式事务等问题，更好支持存储过程、多表关联、复杂查询，因而应用开发，运维容易。

根据 2023 年 8 月 DB-Engines 全球数据库排名 TOP10 中全部关系型数据库均为集中式数据库，同期墨天轮发布的国产数据库排名 TOP10 中的交易数据库全部为集中式数据库或在支持分布式数据库中支持分布式和集中式两种部署模式，这一情况反映了在企业传统业务集中式数据库需求仍中占主流。在金融开放平台转型中集中式数据库或分布式数据库的集中式部署架构同样发挥重要作用，占比约 80%。

根据当前国产集中式部署主流架构可分为主备多副本（存算一体）和存算分离两种。

（1）主从多副本

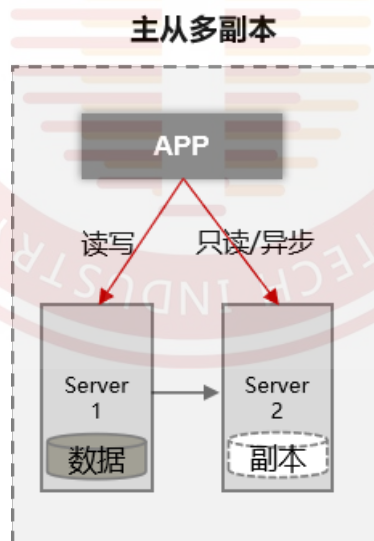


图 3 主从多副本架构示意图

此架构在单机数据库基本上发展而来，数据存储于本地硬盘，需要通过数据库日志同步回放方式生成副本来实现故障切

换和保证数据可用性。主从多副本架构的从节点可作为只读节点访问，因此可以实现读写分离分担主实例压力，实现横向扩展，但由于从节点日志回放为异步，数据不能保证与主节点实时一致，读写分离的应用场景有限。

主从多副本架构实现简单，技术门槛低，大量被开源数据库使用，使用较为广泛。受服务器可靠性、存算一体架构爆炸半径大、本地盘数据重构时间长、存算资源不能灵活扩展等影响，主从多副本架构需要较多硬件冗余，资源利用率较低，故障后数据库服务恢复速度较慢。同时由于日志同步的性能损耗较大，在有大量变更或大事务时采用同步复制对性能影响较大，一些主从多副本数据库产品高可用设计中选择优先保证性能或可以性能和数据一致性中做取舍。在产品选择中需要注意如果选择性能优先则要考虑承受数据丢失的影响或采用其他数据补齐手段。

(2) 存算分离架构

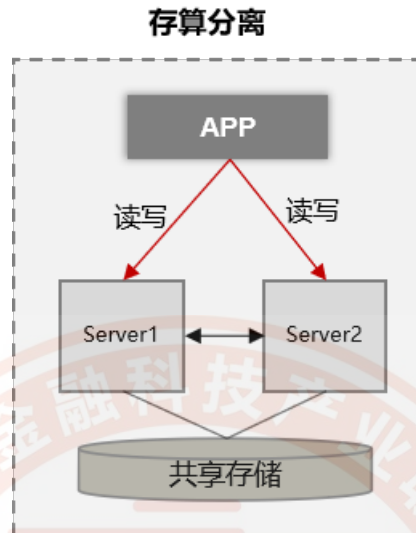


图 4 存算分离架构示意图

存算分离方案通过使用可靠性更高的专用存储设备提升了数据持久化可靠性，同时降低了硬盘故障发生和故障恢复重构对数据库服务的影响。通过存算分离架构，一方面降低了服务器故障的影响，另一方面通过存储的高可用能力替代数据库日志复制进行持久化和容灾对性能影响更小，同时通过存算解耦计算和存储资源都可根据需要分配，资源利用率得到提升，这种资源池化思路与云计算理念吻合，因此同样被云数据库广泛采用。

随着存储能力的不断提升，在存算分离架构下数据库可进一步实现副本缩减、容灾、备份能力下沉，IO 缩减性能加速、并发查询下沉等，进一步提升数据库的可靠性与性能。

由于存算分离架构增加了存储和存储网络，架构复杂度增加，对存储和网络同样有比较高的要求，使用可靠性、性能较差的产品会使存算分离架构的效果大打折扣。在选型时需要重点考虑存储和网络的性能可靠性评估。

2. 分布式

分布式数据库的共同特点是：数据分散存储在不同的数据节点，通过分布式事务实现并行处理，提升数据库的并发性能和容量。

分布式数据库解决了集中式数据库的横向扩展问题，但由于分片间需要通过网络进行数据同步和汇总，尤其是保证分布式事务的强一致性对性能影响较大，因此比较适合数据可实现完美分片的业务。如果有大量分布式事务，或有大量多表间关联查询会造成分布式数据库的性能大幅下降并影响线性扩展。

分布式数据库主要分为分布式中间件和原生分布式两大类。

(1) 分布式中间件

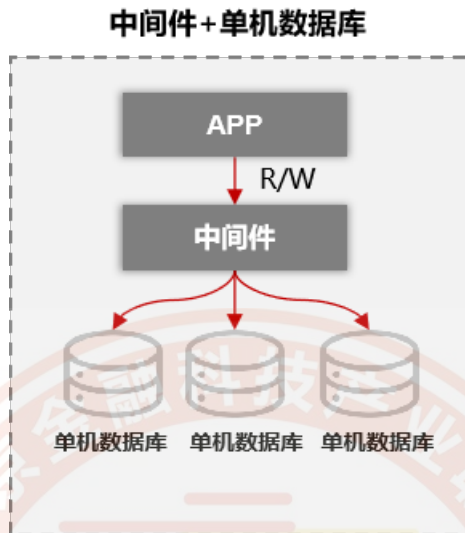


图 5 分布式中间件架构示意图

分布式中间件架构引入分库分表中间件实现数据容量的横向扩展，多采用传统数据库作为数据节点 + 分片路由中间件作为协调节点+ 全局事务管理的架构，其技术特征是基于传统集中式数据库作为数据存储节点，继承了传统数据库的技术积累和成熟生态，数据库存储引擎内核稳定性相对较高，周边生态工具配套完善，但分布式事务支持能力较弱，主要通过柔性事务解决，对应用系统的设计、开发、维护影响较大。

(2) 原生分布式

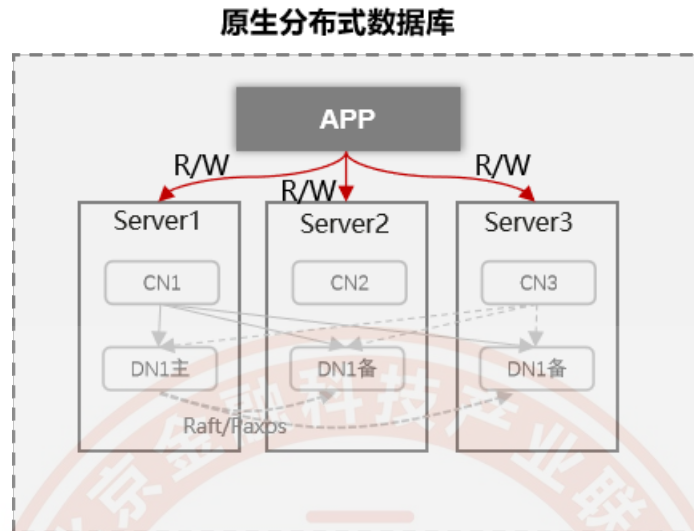


图 6 云原生分布式数据库示意图

原生分布式数据库基于分布式理念构建由分布式事务调度管理和数据库引擎等组成，数据按规则打散，副本通过 paxos/raft 等分布式协议保证一致性，上层实现数据库基础的优化器、执行器等组件，对分布式事务支持更好，很多厂商通过自研的存储引擎自研则进行深度并行查询、算子下推等优化，进一步提升了性能，相对分布式路由架构原生分布式数据库在分布式事务能力、线弹性扩展、数据一致性、防脑裂等方面具备优势。

（三）数据库架构选型建议

1. 集中式与分布式双栈部署架构并用

伴随中国金融业务不断创新发展，金融行业使用的数据库产品和技术日趋多样化。随着金融行业数字化转型逐步深入，金融应用持续创新，金融业务场景的广度和深度都大幅扩展，对金融数据的使用方式日益多样化，单一类型数据库已难以支撑金融行业所有应用场景。分布式/集中式并行发展将在金融行业持续存在，需针对具体应用场景对数据库能力的需求和侧重，选择合适的数据库产品。

金融行业数据库架构转型的重点难点场景，使得分布式数据库成为业界关注的焦点，但集中式部署的应用场景仍然更为广泛，集中式与分布式部署各有其适用的应用场景。分布式数据库解决了集中式数据库性能容量扩展能力不足的问题，相应地也在系统层和应用层付出了多方面的成本。

在系统层面：从专用大型机服务器迁移到通用服务器，单体设备可靠性降低，采用分布式架构可以实现更高的可用性和扩展性，同时也带来冗余备份、网络交互等方面的开销，硬件节点使用规模快速扩张为大型数据中心的节能减排和机房规划带来较大压力。大规模分布式集群的系统复杂度呈指数级上升，必须具备与之适配的运维管理能力作为支撑，需要在运维

管理配套的系统能力建设和人才储备方面加大投入。

在应用层面：将分布式系统完全封装成一个逻辑单库的解决方案虽然能够简化应用开发模型，但分布式系统性能开销太大，因此适用场景有限。为充分发挥分布式架构优势，应用层也需要投入更多的研发设计成本，一是需要进行合理的数据分片设计，通过高内聚低耦合的数据规划，尽可能减少跨节点访问；二是需要在系统架构设计中充分考虑节点故障的容错及柔性事务的处理。

综合来看，集中式与分布式数据库的使用成本见图 7：

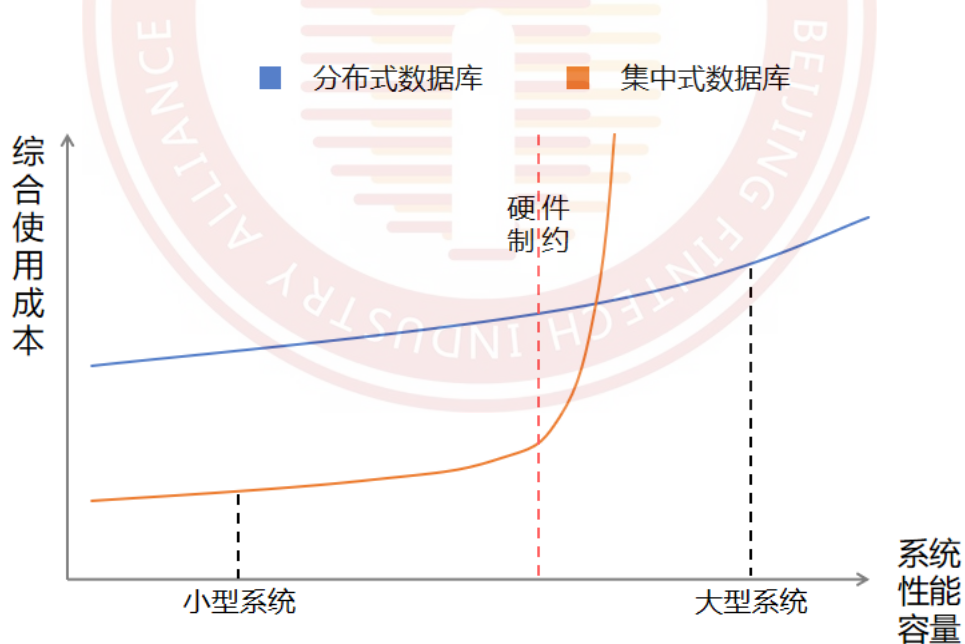


图 7 数据库综合使用成本示意图

当前金融行业存量数据库以小库为主，同时随着硬件能力

的提升，成本拐点会不断右移。由于绝大部分分布式数据库都具备集中式和分布式两种部署模式，可以满足不同业务不同场景的要求。在需求与产品的双驱动下，数据库集中式部署架构在金融机构的转型替换中已占 80%左右。金融用户需要根据业务需要选择合适的部署架构以达到快速转型、降低难度、聚焦业务创新的目标。

2. 基于业务需求及特性选择部署架构

(1) 按业务需求评估架构选型

综合以上分析，在架构选型时需要从业务需求进行评估，从改造难度、业务特征、支撑能力等维度进行选型评估：

a) 业务特征评估

1) **改造难度**：考虑到存储过程、复杂 SQL 进行分布式改造难度大，当需要大量使用复杂查询、存储过程尤其是存量业务替换时，可采用集中式部署架构实现对等架构替换；反之如果业务为新业务或基本未使用存储过程、复杂 SQL 可评估其他特征是否可使用分布式部署。

2) **分布式事务性能影响方面**：由于分布式事务对强事务一致性操作性能影响较大，需要控制分布式事务使用比例。如果业务逻辑难以避免大量分布式事务或希望简化应用复杂度，

可考虑采用集中式部署模式；如果业务可设计相对独立的分片，并降低 SQL 语句复杂度，则可以结合业务场景需求使用分布式部署模式。

3) **稳定性、运维等方面考虑：**当分片较多使节点数膨胀以及跨节点架构复杂性造成性能稳定性下降、故障定位难度增加，备份困难等运维问题，如果业务对这些方面要求较高，需要考虑采用集中式部署模式。

b) 支撑能力评估

集中式部署模式以 Scale Up 方式扩展为主，如果在业务特性评估中需要选择集中式部署但并发性能、容量超出单库规格时，则需要考虑从业务侧做数据拆分或迁移非结构化数据、历史数据实现瘦身，如单库能力仍无法支撑，则需要评估使用分布式数据库的可行性。

以下为业务需求进行部署架构选型流程图：

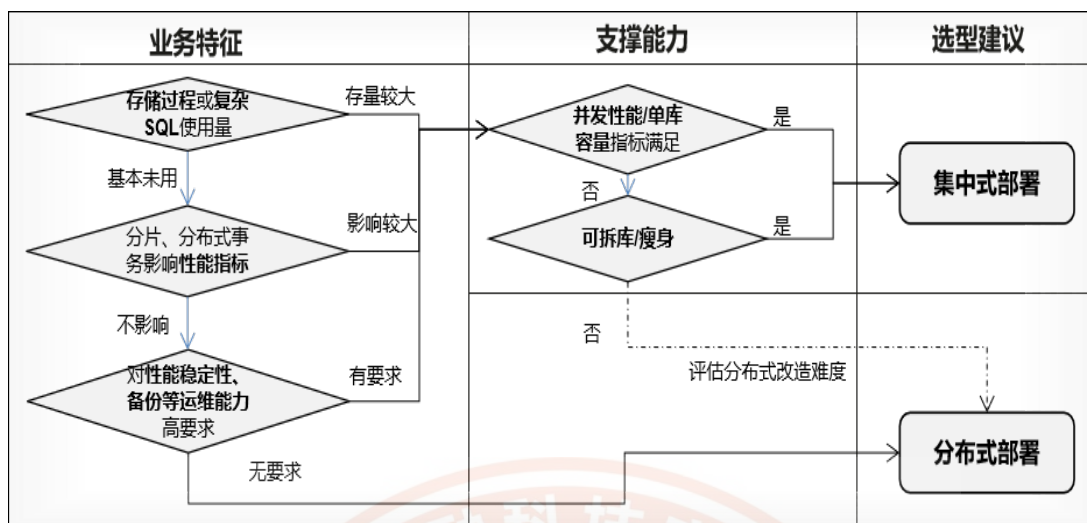


图 8 数据库部署架构选型流程图

(2) 根据业务类型选型

从业务需求评估模型可以看出，集中式/分布式部署模式选型结果与稳态/敏态业务有高度对应性，因此也可以从业务特点分类角度进行数据库选型评估。

a) 稳态业务较适合采用集中式部署模式

稳态业务：金融核心业务多为稳态业务，特点是业务稳定，增长平稳，对**稳定性**、可靠性、响应性能要求高，运维保障措施严格，适合集中式部署架构。同时稳态业务中存量业务多，适合采用集中式数据库实现原位架构平替，因此**稳态业务**采用集中式部署实现替换可有效降低转型难度，保证业务稳定。

b) 敏态业务较适合采用分布式部署模式

敏态业务：特点是业务发展迅速，迭代快、数据增长快，需要较强横向扩展能力，并且很多可通过数据分片较好实现并发处理提升并发性能和容量，敏态业务以创新型业务为主，比较典型的是互联网类业务，这类敏态业务采用分布式部署有利于发挥分布式分片横向扩展能力，支撑敏态业务高并发大容量、突发流量峰值高的需要。

三、开放平台数据库转型方法

数据库转型方法三阶十二步：开放平台数据库转型建议参考以下三个阶段进行整体规划：方案规划设计阶段、数据库迁移阶段和投产运行阶段。数据库转型方法三阶十二步见图 9。



图 9 数据库转型方法三阶十二步

(一) 方案规划设计

方案规划设计阶段主要工作包括：部署方案、容灾方案、

迁移方案、测试方案。

现状调研：规划设计前，建议进行数据库现状调研，重点包括数据库信息、业务信息、性能容量指标，对数据库迁移可行性分析，确定数据迁移内容与范围，业务可接受的影响时间等信息。例如，**数据库信息：**数据库版本、实例数、数据总量、数据增量、业务 SQL 信息、并发数、容灾备份机制及要求等；**业务信息：**业务系统架构、业务时延要求、业务并发要求等；**性能容量指标：**TPS/QPS、数据库运行 CPU 峰值、CPU 峰值换算公式等。

1. 部署方案

优先原位替换：数据库部署方案优先选用“原位替换”原则。传统数据库替代难度大为业界共识，如果对应用系统进行分布式改造，对业务逻辑进行重构，面临技术复杂度高、工作量大、项目周期长、实施风险高等痛点问题。通过原位替换，可屏蔽数据库特性差异，保持业务逻辑，有效降低技术复杂度和转型工作量，解放应用研发人员的生产力，聚焦于金融业务的创新。

云化服务部署能力：数据库部署建议考虑云化服务和自服务的能力，充分利用云化资源池能力，按需提供数据库服务，实现从应用节点到数据库节点全链路的资源弹性伸缩能力。

软硬协同部署设计：考虑现有目标数据库同传统数据库整体能力的差异，部署方案需要从软硬协同系统角度设计，对源数据库的性能、数据量、高可用及容灾部署进行分析，根据目标数据库对应能力的支持情况，统筹规划整体设计。数据库系统涉及**服务器、存储、网络、操作系统、中间件等软硬件组件**，要充分协同各组件的特点及其能力，提升目标数据库系统的整体能力。例如，工行的数据库集中式部署协同企业级存储盘机，通过存算分离，具备 PB 级海量存储能力，单库数据量可以支持数十 TB，基本持平或超过传统数据库存储支持容量。

集中式和分布式双栈部署：集中式部署以服务稳态业务场景为主，具备架构简单，易部署易运维，兼容存储过程，应用不需重构易迁移，数据库网络交互少，时延低等特点。集中式部署具备较好的原位替换能力，部署时建议考虑传统 FC-SAN 企业级存储及网络的转型要求，进行 RoCE-SAN 企业级存储及网络的升级。集中式部署架构示意图 10。

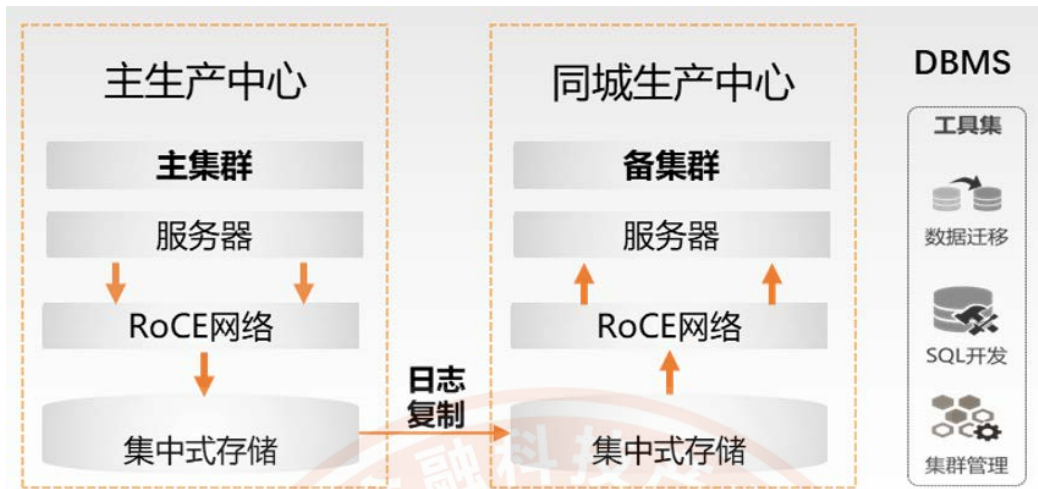


图 10 集中式部署架构示意图

分布式部署以服务敏态业务场景为主，具备并发高，适配业务量持续快速扩展，容量大，易水平扩展，单点故障半径小，需要应用做数据分区访问调优和改造等特点。分布式部署架构示意图见 图 11。

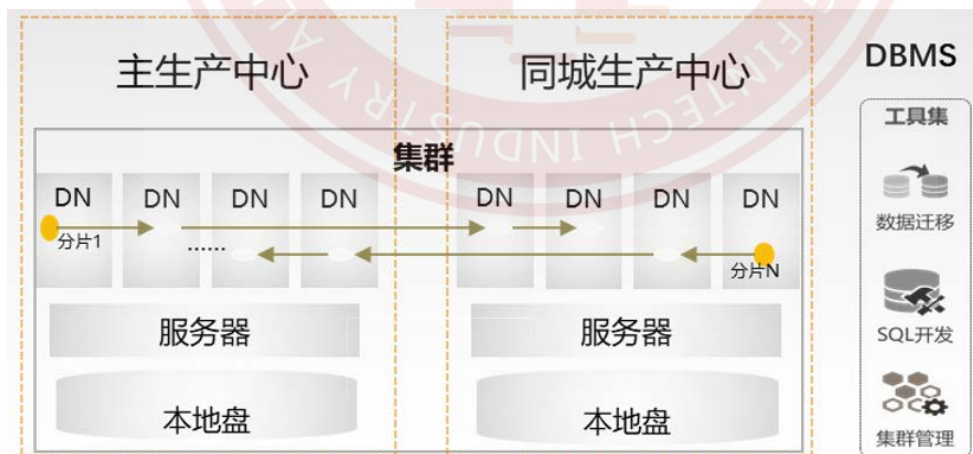


图 11 分布式部署架构示意图

开放平台数据库部署建议根据服务业务场景特征和所需支撑能力，选择集中式或分布式部署。

2. 容灾方案

容灾等级要求：数据库容灾方案需要参考《银行业信息系统灾难恢复管理规范 JR/T 0044-2008》和《分布式数据库技术金融应用规范灾难恢复要求 JR/T 0205-2020》，根据应用对应的容灾等级进行设计，按照容灾等级对于 RPO、RTO 及同城或异地灾备要求进行建设。

软硬协同容灾设计：容灾系统涉及数据库、负载均衡器、服务器、存储和网络，建议对相关组件统筹设计规划，可参考传统数据库灾备特性，例如 Oracle 数据库的 ADG、存储复制、备份等，以满足监管的要求，提供 7*24 小时的服务连续性。例如工行部署的同城双中心双集群容灾方案，通过同城两个数据中心部署两套独立的数据库集群软件，实现完全隔离的软硬件架构，支持数据库版本升级和应用灰度升级，确保业务在主中心升级时无中断地切换至备中心，实现了全天候的稳定服务，RPO=0，RTO<=2 分钟。

备份与恢复：为了对数据库中的关键数据提供安全保护，降低灾难性事件发生后可能产生数据丢失的风险，建议定期进行数据库的进行备份操作，并根据可容忍丢失的数据量，可承受的数

据恢复时长，需要恢复的数据和数据量等因素，制定备份策略并进行备份与恢复的测试演练。备份方法可以选择全量备份和增量备份，全量备份保障数据完整性，增量备份保障备份和恢复效率。备份恢复常见的类型有物理备份恢复、逻辑备份恢复、闪回恢复。物理备份恢复适用于数据量大的场景，主要用于全量数据备份恢复，也可以对整个数据库中的归档日志和运行日志进行备份恢复；逻辑备份恢复适用于数据量小的场景，可按用户需要进行指定对象的备份和恢复，灵活度高；闪回恢复适用于快速恢复误删除或误更改的数据。

3. 迁移方案

迁移方案主要工作包括：**数据库迁移方案和应用迁移方案。**

(1) 数据库迁移方案

数据库迁移方案：参考数据库当前部署及容灾方案的设计，完成数据库迁移方案设计。数据库迁移需要同步考虑业务逻辑，包含数据库对象迁移、数据迁移、应用迁移、迁移验证等方面的分析与设计。

自动化迁移：迁移过程尽可能实现自动化，包括数据库对象、复杂特性的迁移，以及全量和增量数据的同步迁移。数据库分布式部署需要考虑数据的键值、重分布等设计，集中式部署如果数

数据库容量受限，可以采用拆库等设计。

(2) 应用迁移方案

同应用开发生命周期流程融合: 数据库转型时建议同步完成与应用研发相关生命周期流程的整合和对接，例如版本管理、配置中心、注册中心、安全认证中心等，更好构建全金融业务场景的支撑能力，覆盖办公系统、一般业务系统和关键业务系统。

先以原位替换为主: 传统数据库的存储过程等特性，可以简化应用开发，减少数据在数据库和应用之间的传输，存储过程应用广泛存量较大。替换数据库时同步替换应用逻辑，工作量大、验证量大，建议转型时采用“两步走”实现。第一步保持现有应用逻辑，如存储过程，进行原位替换，先替换传统数据库；第二步逐步改造应用逻辑，消除特定数据库专用特性。

应用代码迁移: 包括应用层代码中与数据库迁移相关的代码改造，如 Java 程序改造、动态 SQL 改造、JDBC 改造、ORM 框架迁移、批量迁移等工作。

4. 测试方案

全量自动化测试: 数据库作为金融应用系统的关键核心基础平台，目标数据库必须通过严格的全量测试验证，确保替换之后继续保持生产平稳运行，测试过程建议实现测试流程的自动化。

对于测试验证期间发现不满足业务响应时间要求的问题，应针对具体原因进行优化，使其符合业务要求。

主要测试活动：包括功能测试、性能测试、迁移测试、验证测试。其中，功能测试覆盖业务应用系统的全量功能；性能测试验证应用系统达到要求的性能指标；迁移测试完成数据一致性和正确性测试；验证测试完成业务使用和体验进行测试。

（二）数据库迁移

数据库迁移阶段主要工作包括：数据库对象迁移、数据迁移、应用代码迁移和测试验证。

1. 数据库对象迁移

自动化对象迁移：数据库对象迁移作为迁移阶段关键起始工作，涉及对象的范围广、数量多，人工迁移成本高、易于出错，建议尽量通过自动化工具完成。

数据库对象迁移：是将源库的数据库对象迁移到目标库，包括分析传统数据库对象，将静态对象 DDL 转换为目标数据库语法，并创建到目标库中等关键步骤。

数据库对象：主要包括数据库表、索引、存储过程、序列、视图、触发器、自定义类型等。迁移过程中，要做好迁移前后源

和目标数据库对象的比对，保证迁移对象的一致性。

2. 数据迁移

异构数据库数据复制工具：数据迁移工作是完成数据库迁移及生产投产及切流的前提，建议使用异构数据库数据复制工具，实现异构数据库间存量数据和增量数据双向复制，完成数据迁移工作。

数据迁移场景：可分为**全量数据迁移**和**增量数据迁移**。数据迁移后通过数据校验，即当增量数据同步无延迟，达到实时的时候，对两端数据进行比对，确保数据迁移准确。

(1) 全量数据迁移

全量数据迁移：是指将源数据库中的业务数据全部迁移到目标库，这个过程一般采用批量的方式进行数据的同步，在**同构数据库迁移**的场景中，可以采用数据库的备份和恢复功能，也可以采用数据库自带的数据库导出和导入工具。在**异构数据库的全量迁移**场景中，因为不同数据库之间的数据类型、存储格式等各不相同，一般采用数据库特定接口或 SQL 接口的方式进行迁移。

(2) 增量数据迁移

增量数据迁移：是将源数据库实时变化的数据同步到目标库，

实现增量迁移的方式有很多种，如基于时间戳的定时同步、基于触发器的增量同步和基于日志解析的实时同步，对比各种方式，基于日志解析的同步方式无论从对源库的影响还是实时性都是最优的。

3. 应用迁移

应用改造：主要是基于源数据库和目标数据库的 SQL 语法、接口驱动和数据库工具等差异，对应用进行适配改造。如采用分布式部署，还需对应用逻辑同步改造，工作量大。应用改造主要包括如下内容：

- 提供源数据库和目标数据库的差异化列表；
- 提供 SQL 录放工具，输出 SQL 回放报告；
- 根据数据库的差异和 SQL 兼容性列表，梳理应用的改造点；
- 完成应用 SQL、驱动和数据库工具等的改造替换；
- 完成改造后的应用系统的适配测试和性能测试等。

流量回放：在源数据库的捕获流量，在目标数据库回放流量，并输出对比报告。通过**性能回放**，模拟现网的性能负载，提前进行性能压测和摸底验证；通过**一致性回放**，抓取生产的真实负载，在目标库回放，验证正确性和抗压能力。

4. 测试验证

全量功能、性能测试：系统切换到新数据库后，通过迁移比对、SQL 录放等测试来验证新系统的功能和性能满足现网生产运行。测试验证是数据库迁移的重点工作，有效地测试验证，可以保障数据库架构转型平稳可控。

自动化测试工具：测试活动工作要求质量高周期长，建议构建并使用全流程自动化测试工具，包括功能、性能、迁移、验收等各方面的测试，降低测试人力投入和测试复杂度，提升测试效率，实现全量覆盖程序测试及分支测试。

（三）投产运行

投产运行阶段主要工作包括：生产投产、并行切流、传统数据库退库、安全保护与运维监控。

1. 生产投产

“空中换心”：数据库作为金融应用系统的关键核心基础平台，投产目标数据库必须确保应用实施“飞机空中更换发动机”之后保持生产平稳运行。明确投产过程中不能停止业务，保证投产数据的正确性和投产脚本的健壮性。

组织投产演练：为保障投产的稳定，可以提前组织并实施投

产演练工作，力保投产工作万无一失。建议投产演练和正式投产采用完全一致的流程。

投产最佳实践：正式投产需要综合考虑各种突发事件和问题，做好提前应对及回退计划，可以借鉴以下经验：

(1) 投产要预留足够的时间窗口，各应用逐个割接，选择应用低峰期进行投产；

(2) 投产前做完整的数据库备份，做好回退应急方案；

(3) 加强投产过程监控，提前梳理需要监控的各类指标。

2. 并行切流

双轨运行：为保证金融数据库的安全高可用，建议通过源和目标数据库并行运行，分批次切流的方式进行替换。在并行切流双轨运行阶段，通过业务增量归档数据在异构数据库间的双向复制，实现新旧系统业务数据的准实时一致，确保故障场景下能及时回切，提升对外服务的连续性。

灰度切流：业务切流通过录制源库交易流量并在目标库上回放，验证数据库迁移后系统功能和性能容量。按转型计划节奏进行灰度切流方案，逐步引流到目标库，最终实现目标数据库完全承接业务流量。

3. 传统数据库退库

平稳退库：为保障生产运行安全稳定，迁移目标库完全承接业务流量后，需经过一段时间平稳运行的验证，再撤除源库上的回切逃生路径。

倒排计划：根据传统数据库退库任务目标的时间节点，倒排应用投产切流时间计划，充分预留技术验证与问题修复时间，确保退库目标按期安全完成。

4. 安全保护与运维监控

(1) 安全保护

五维数据安全：数据安全涉及**数据安全计算、数据安全存储、数据安全传输、数据安全展示及数据安全运维**五个维度。例如，数据安全计算通过全密态数据库解决，数据安全运维通过防篡改数据库、密态数据库解决，数据存储加密技术解决，数据安全传输通过 HTTPS、TLS 加密技术解决，数据安全展示通过数据动态脱敏技术解决，数据安全存储通过透明加密。

全密态数据库：涉及数据安全计算、存储、传输、运维多个环节，是专门处理密文数据的数据库系统。加解密过程仅在客户侧完成，数据在存储、传输、查询整个生命周期过程中均以密文形态存在，避免管理员恶意获取密钥解密数据。

安全保护特性：金融数据库的安全是底线，相关安全要求可以参考《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求 GB/T 22239—2018》，其中为满足安全等保 4 级对重要数据存储的机密性、完整性保护需求。建议目标数据库具备访问控制、透明数据加密、全密态计算、动态数据脱敏和防篡改等安全保护能力。

(2) 运维监控

全面对接运维体系：数据库作为应用系统的重要一环，建议数据库运维监控全流程对接已有的运维体系，更好地支撑全业务场景。可监测能力包括对关键性能、容量、高可用指标持续监控和超阈值预警，对软硬件故障、问题及时发现、定位，给出处理建议。

数据库运维监控平台：数据库系统运维涉及数据库、操作系统、计算、存储、网络等多层面，每一层都可能发生故障，不同层次发生故障可能引发相同的亚健康现象，可建设统一运维监控平台，进行全链路、全方位的监控。运维监控平台主要能力包括数据库运维、SQL 诊断和调优、容灾管理、实例运维等。

数据库不死可监控能力：在数据库异常时，首要原则是保证整个系统的不死可监控。例如数据库出现大事务、慢 SQL 异常时，要能够保证对外服务不间断，同时，要能够分钟级处理异常。

四、数据库转型实践

（一）现状

工商银行金融产品数量多，服务的客户体量大，对应系统数量庞大和体系复杂，大部分核心系统都是要求 7*24 小时服务不中断，服务连续性要求高，且广泛应用与数据库产品耦合度较高的存储过程等高级特性，历史资产重。涉及总行应用接近 200 个，涵盖核心业务、渠道、前置、外联、管理与支撑等多类业务系统，其中高等级应用超过 90 个。

（二）挑战

传统数据库之所以在金融行业存量系统中占有较大规模，与其极强的功能黏性、优秀的系统稳定性、良好的软硬适配能力和对金融业务的良好支撑密不可分，且金融业存量系统往往与数据库特性高度耦合，大量业务逻辑内嵌到数据库实现，且具有历史比较久远、业务长期稳定、关联应用较多等特点，在数据库转型过程中面临诸多挑战：

1. 服务连续性能力要求高

金融核心应用 7 * 24 小时对外服务不中断，传统数据库及国际主流的通用基础应用产品，具备优秀的系统稳定性和可靠性，经历了工商银行长年复杂业务和高稳定的考验，能支持高性能、

大容量业务的长期稳定运行。而自主创新软硬件产品尚处于快速迭代、加速成熟的过程中，在保证金融业务服务连续性方面，对国产化数据库的数据可靠性高、系统可用性、集群性能及服务连续性能力提出更高要求，需要保证数据库转型过程中的生产安全和迁移后长期稳定可靠运行。

2. 高级特性和存储过程重度使用

传统数据库转型替代难度较大为业界广泛共识，尚无成熟的原位替代解决方案，金融企业多采取对应用系统进行分布式改造、对业务实现逻辑进行重构的方式实现转型。工商银行合计使用了超过 40 类传统集中式数据库对象、24 类基础数据类型、200 个系统内置函数、70 个系统高级包和 200 个系统视图，且广泛适用自定义类型、自定义函数、递归、嵌套、多表关联、自连接等众多高级语法特性，存储过程代码总行数达到亿级规模，数据库对象总数量超千万。数据库转型过程中，面临技术复杂度高、工作量大、项目周期长、实施风险高等挑战。

3. 业务逻辑复杂

金融业存量业务系统，具有历史比较久远的特点，经过长期演进，业务逻辑复杂，且与其他业务系统的关联关系复杂，交易调用链路相互交织。

技术复杂度高：业务系统数据库转型，往往伴随着存量技术

资产、业务资产、关联关系梳理，涉及数据库对象迁移改造、应用代码改造、新旧系统双轨并行并叠加业务系统之间交易链路对接等工作，甚至涉及应用架构和业务逻辑重构等工作，技术复杂度高。

迁移改造工作量大：涉及海量数据库对象数量、存储过程代码行数、应用程序代码行数和广泛使用高级语法特性，要保证迁移后系统功能对等、性能满足要求，应用迁移改造工作量大。

全量测试难度高：存量系统业务逻辑经过长期的历史积累和沉淀，复杂度高，测试阶段要实现全分支、全流程的全量业务功能回归测试，存在较高的难度。

保障生产安全的挑战大：自主创新软硬件产品的性能、稳定性、成熟度等方面与传统商用软硬件产品相比还存在一定的差距，确保转型的平滑、稳定、安全，成为数据库架构转型中的难点，需做好业务双轨并行、灰度分批切流和应急回切等措施来规避。

4. 应用系统数量庞大

工商银行金融业务种类齐全，应用系统数量庞大、体系复杂，在全面转型推广工作中，需支撑不同类型业务系统高效、快捷、平稳转型，建设具备工程化推进、快速复制推广的标准化转型方案体系、配套工具体系和技术资产体系等，存在较大的技术挑战。

(三) 转型实践

1. 突破数据库关键技术

(1) 构建分布式数据库精简模式部署形态，实现稳定性性能规格突破

工商银行对标主机 DB2 和 Oracle 数据库，按照“分布式架构+集中式体验”的理念，联合华为公司和金融同业，基于全栈自主创新软硬件产品，实现了分布式数据库的技术突破：

软硬件协同，提升性能：通过多核并行、基于代价的分布式并发事务并发优化和全链路并行编译执行等，实现了分布式查询技术优化，良好的兼顾了金融业务系统高并发联机业务场景和复杂计算批量场景的需求，具备百万级 QPS 能力；

采用存算分离架构打破单库容量瓶颈，实现弹性扩容：通过计算存储分离、存储资源池化、在线弹性扩展等，具备 PB 级海量存储能力，良好的支撑了历史明细类、报表等金融业务专题的海量数据处理需求；

打造监控运能力：为通过用户级、连接级和 SQL 级三级资源隔离以及告警、健康状态报告、日志分析/慢日志、SQL 全链路监控等，构建高效运维能力，确保系统稳定运行。

构建精简模式支持集中式数据库原位替换：构建精简模式

(分布式数据库的集中部署)，优化集中式部署性能可靠性，满足业务对部署形态的不同需求，支撑大量存量业务原位替换需求，同时相同产品多部署形态实现开发、运维能力的统一构建。

(2) 提升容灾能力构建多级容灾体系

为确保应用转型能力服务能力、安全稳定能力持平，容灾能力有提升，工商银行对标原主机 AB 站点双活方案，基于存算分离架构与厂商进行大型业务系统 Oracle 数据库转型的多集群方案技术攻关，首创建成多集群多中心部署的高可用架构，满足金融业务系统服务连续性要求：

一是同城双园区间通过存储级复制实现增量数据强一致同步，异地园区间通过异步方式实现增量日志同步，具备本地 $RPO=0$ & $RT0 \leq 30$ 秒、同城 $RPO=0$ & $RT0 < 180$ 秒和异地 $RPO < 1$ 分钟 & $RT0 < 10$ 分钟的金融级高可用通力；

二是实现双集群故障和运维隔离、支持灰度发布：基于同城双园区双集群部署架构，实现双集群间跨数据库版本的相互兼容和增量数据的强一致同步，具备业务不中断情况下数据库版本灰度升级通力，在数据库版本升级异常情况下，具备 $RPO=0$ & $RT0 < 180$ 秒的回切能力。同城双集群部署架构示意图 12。

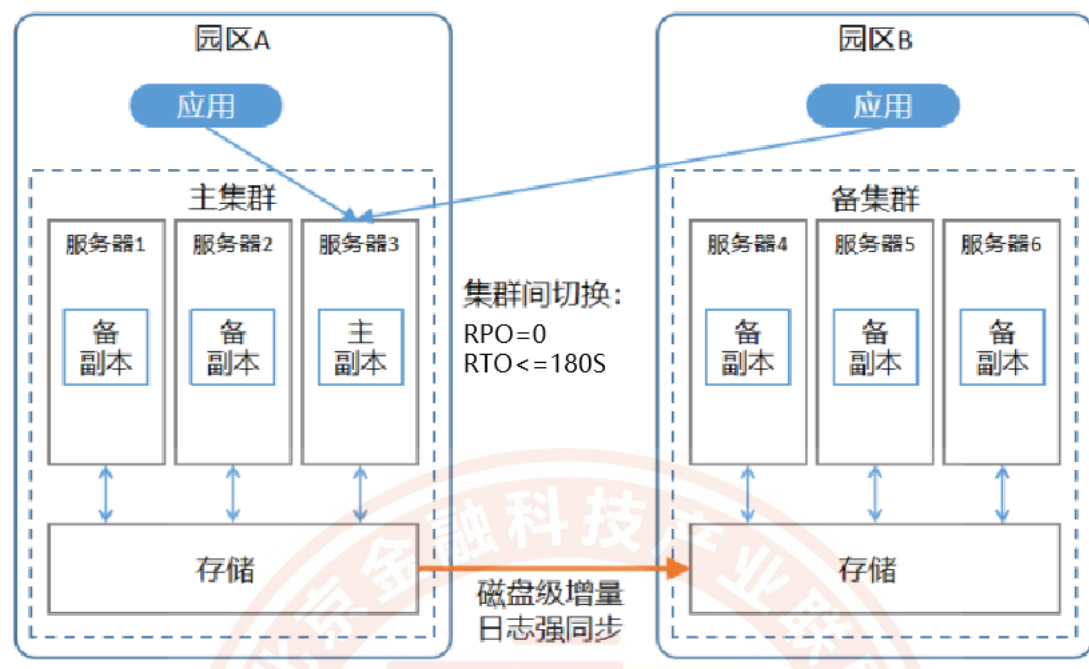


图 12 同城双集群部署架构示意图

构建分级容灾方案：目前工行综合应用存储级日志复制、数据库流复制等多种技术，形成多地多中心多集群容灾方案体系，满足不同等级金融业务系统的容灾需求。分级容灾方案示意图 13。

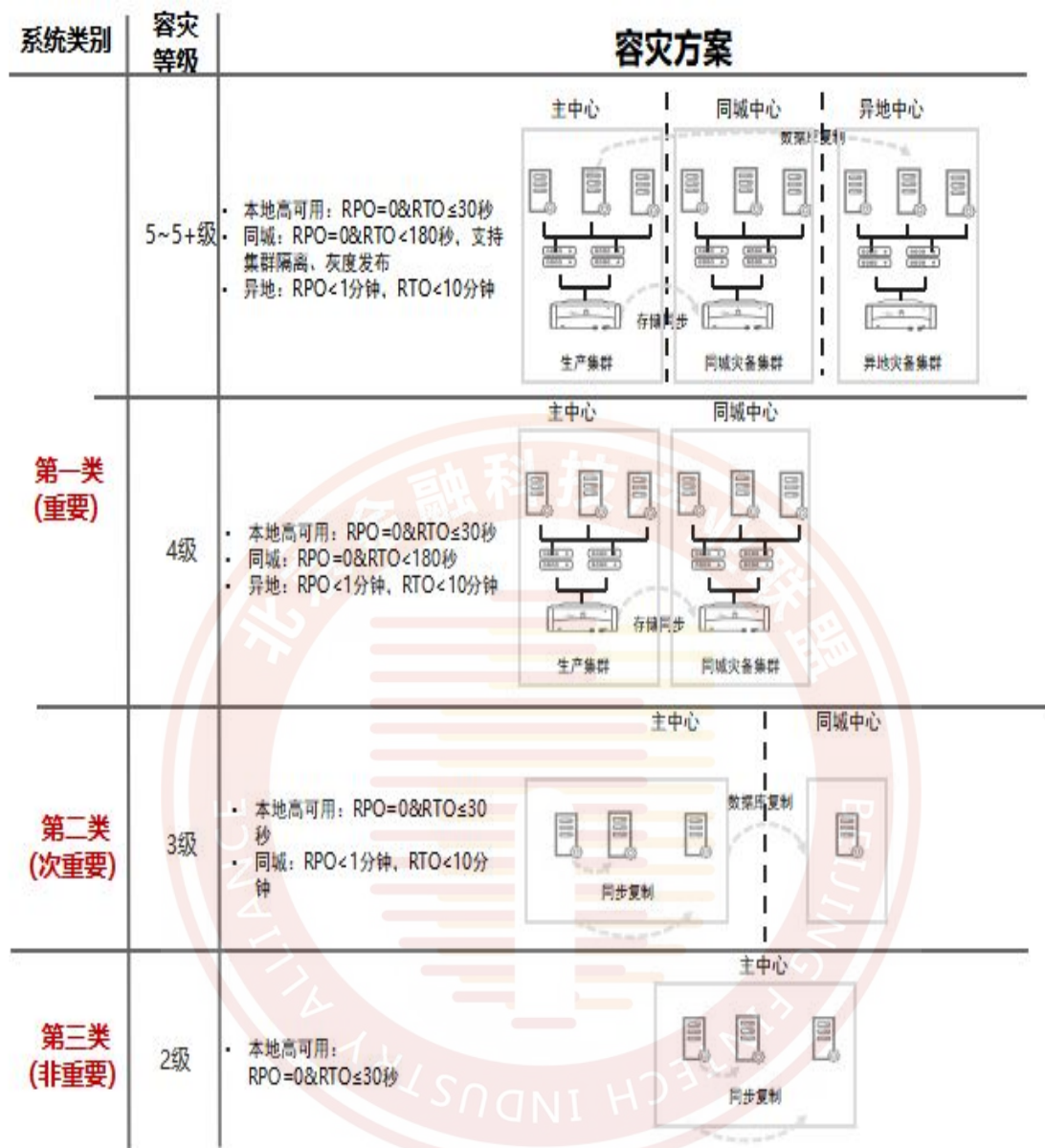


图 13 分级容灾方案示意图

2. 构建原位替代模式降低存量迁移难度

针对存量业务累积构建大量业务逻辑内嵌到数据库内分布式改造难、存储过程迁移难等问题，工行采用稳态业务原位替

换模式有效降低技术复杂度和转型工作量。解放了应用研发人员的生产力，让金融科技力量更加聚焦于金融业务创新和数字化转型领域：

(1) 稳态业务原位替换，平滑迁移

对有存量存储过程的业务，优先采用精简模式，以集中式部署形态进行平移替换，对于当前部分国产数据库并发性能无法满足的巨石类业务，优先考虑进行数据库拆分，保留存储过程，从架构层面避免或减轻了迁移改造的诸多挑战：

降低改造难度，减少工作量：避免了大量存储过程、复杂SQL改造，减少应用控制分布式事务等方面的负担，同时由于是架构平替，降低了存量业务工具化迁移难度，进一步减少工作量，使有限的精力可更聚焦于业务。

降低应用迁移风险：降低了历史大量累积的业务逻辑在迁移时出现问题的风险。在业务逻辑保持不变的情况下，可以通过自动化测试工具、流量回放工具减轻测试工作量，更好保障迁移质量。

(2) 敏态业务分布式改造

对业务增长迅速，可通过分片较理想实现并发、容量提升，且无存量存储过程、复杂查询的业务，可进行分布式改

造，采用分布式数据库替换。

3. 实现平滑迁移

为解决迁移转换工作量大，测试覆盖难等问题，工行联合头部科技企业开展 Oracle 数据库平滑迁移技术攻关，通过多试多用，不断总结经验，研发全流程自动化迁移、自动化测试、自动化仿真验证、灰度切流工具，配套建设完备的技术资产社区和全流程标准化转型工艺，实现了复杂数据库特性和巨量存储过程的自动化迁移能力，人工改造成本压降 90%以上，有效解放了生产力，让科技力量更加聚集于金融业务创新和数字化转型领域。

自动化迁移：实现数据库表、索引、存储过程、序列、视图、触发器、自定义类型等数据库对象和高级包函数、自治事务、递归调用、自连接等复杂特性的自动化迁移能力，以及全量和增量数据的自动化同步，自动化迁移成功率达 95%以上，人工改造成本压降 90%以上，突破了数据库转型的技术瓶颈和实施障碍。

自动化测试：研发覆盖单元测试、功能测试、性能测试、生产验证和测试管理过程的自动化测试工具链，降低测试人力投入和测试复杂度，提升测试效率，程序测试覆盖率达 100%，分支覆盖率达 95%，保障数据库架构转型过程平稳可控。

自动化仿真验证：构建交易录放工具，通过一致性流量回放和性能回放，仿真阶段实现业务功能全覆盖测试和接近实际生产业务压力的性能、可用性及可靠性测试。

灰度切流：建设异构数据库数据复制工具，实现异构数据库间存量数据和增量数据双向复制。在双轨运行阶段，通过业务增量归档数据在异构数据库间的双向复制，实现新旧系统业务数据的准实时一致，确保故障场景下能及时回切，提升对外服务的连续性。数据同步效率可达 150GB/小时。

4. 形成开放平台数据库转型的普适性解决方案

在关键技术突破、原位替代模式和工具体系构建基础上，工行构建了**预迁移、数据库对象迁移、数据库对象比对、数据同步、应用代码迁移、测试验证、生产环境搭建和双库并行/灰度引流** 8 个标准工艺步骤，发布包含架构部署指引、接入指引、工具使用指南、语法兼容性指南、改写指引、常见问题库等涵盖转型全流程的 40 余份文档手册，构建了体系完备的转型社区和完整清晰的标准化工艺步骤。数据库转型 8 个标准工艺步骤见图 14。



图 14 数据库转型 8 个标准工艺步骤

(四) 转型效果

经过大量实践，工行形成了一套无需整体重构 Oracle 存储过程逻辑，低成本、高效可控的原位替换转型技术方案、配套工具和转型方法论，构建全金融业务场景支撑能力，广泛用于包括个人网银、信贷系统、贵金属等 130 多个业务系统，覆盖办公系统、一般业务系统和关键业务系统各类业务专题。采用精简模式、存算分离等架构设计简化复杂问题，通过数据库与国产众核处理器、企业存储协同构建的高性能、高可用、高安全、弹性伸缩、双集群容灾能力以及自动化数据迁移、同步工具能力数据库产品商业版本中落地，具备快速推广的能力。标准化工艺具备良好的通用性，对金融同业开放平台数据库转型降低难度、实现能力不降级，解放金融科技生产力聚焦业务创新和数字化转型具有良好的借鉴意义。

五、金融行业应用数据库转型未来展望

（一）云原生数据库各类技术路线相互融合

作为金融信息系统关键核心基础设施，数据库一直是学术界和产业界持续创新的重点领域，技术热点频现，产品形态众多，各数据库技术路线高速演进，呈现出相互融合发展的趋势。

一是市场竞争推动技术力量整合。部分研发实力较强的数据库厂商，前期并行投入多条技术路线。随着数据库市场竞争白热化，不约而同开始推动数据库品牌统一和产品线融合。

二是单一产品跨多条技术路线发展。从数据库产品的层面，各种产品互相借鉴引入其他技术路线数据库的能力，通过大量工程优化弥补架构设计上的不足，在适用场景上有很程度的重叠，已经出现了一款数据库产品同时跨多条技术路线的情况，比如部分 NewSQL 数据库往云原生方向发展、部分中间件架构数据引入原生分布式一致性协议。

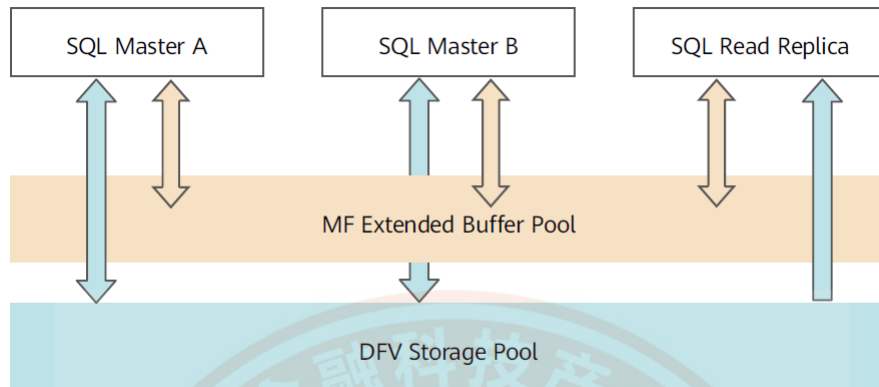
各技术路线在融合与交织发展中，共同向着解决用户不断发展的业务需求和使用痛点这一目标动态收敛。分布式数据库产品在金融行业的应用与推广，无论选择哪条技术路线，都需

更加重视产品化能力提升。满足金融行业在高可用容灾、数据一致性、业务连续性和系统可扩展等方面的更高要求，提升分布式环境下对应用研发和系统运维的支持能力，是金融级数据库最核心的竞争力。

例如，分布式数据库产品不仅需要提供金融级高可用能力，在节点级/园区级异常故障场景下保证数据服务可用性，还需充分考虑新旧数据库系统迁移期间、数据库版本升级期间、云底座或网络等基础设施升级变更期间、应用版本数据库对象投产期间、大批量作业执行期间等各类实际落地的应用场景，提供完整的业务连续性解决方案。

技术驱动型产业需依次经历技术、产品、生态三个发展阶段，分布式数据库目前已转入产品竞争阶段。分布式数据库在技术上屡有突破，在多数单项技术指标上都能实现对传统数据库的超越。而在产品化方面，分布式数据库因为发展时间普遍较短，分布式环境下又引入了新的挑战，产品化程度对比商业集中式数据库还存在一定差距，需要通过实际的应用场景持续打磨，提升产品成熟度。数据库内存池化架构示意图 15。

1. 内存池化，全栈解耦，追求极致的弹性伸缩



* 来源：华为云 GaussDB 数据库

图 15 数据库内存池化架构示意图

在架构上云原生数据库要实现内存池化和全栈解耦。当前主流商用的云原生数据库都完成了计算层和存储层的解耦，接下来计算资源层中算力与内存也会解耦，计算能力池化、内存容量池化、存储能力池化，达到“计算 - 内存 - 外存”三层资源彻底解耦可分别进行弹性热伸缩。

基于存算分离三层解耦的云原生数据库，可以支持分钟级别的节点扩展能力，几分钟内就可以增加一个只读节点；秒级的高可用切换，在几秒内完成端到端的切换；秒级存储扩展能力，秒级资源释放回收能力，秒级快照备份能力。

2. 基于内存池的 HTAP，释放软硬协同的潜能

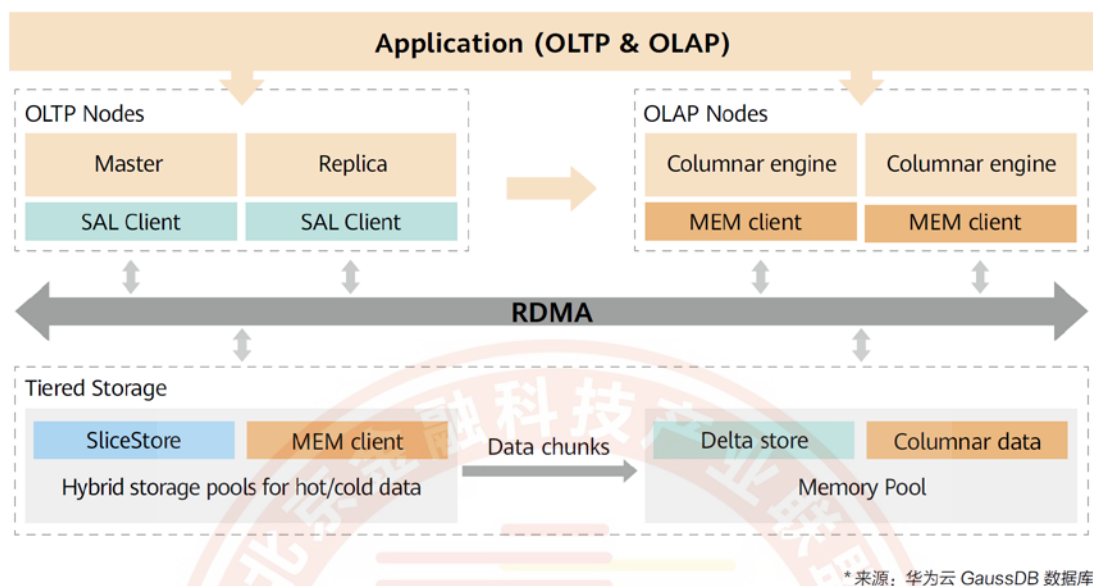


图 16 HTAP 架构示意图

内存池化后给云原生数据库也会带来一些新的挑战，比如内存池相比本地内存时延是有差异的，数据库软件结构需要适配改造，减少这部分的影响；内存池化后的可靠性恢复如何保障；内存池化后数据库如何管理和判断存放哪些数据；不同业务使用内存池的隔离性问题等等。如何在技术上应对这些挑战并将内存池更好地用起来，是一个需要持续探索的领域。

将内存池技术和 HTAP 结合是其中一个趋势。云原生数据库在 OLTP 和 OLAP 能力融合的基础上，未来更进一步结合内存池软硬协同，实现网络吞吐的大幅度缩减，同时也将内存池的性能优势发挥到极致。

其中的关键技术包括：1) 使用 SCM (Storage Class Memory) 新介质，基于内存池对数据进行加速，提供 PB 级数据量、万级并发、毫秒级访问时延；2) 结合 AI 深度学习，根据应用负载和系统资源实现语句级自动弹性，自动确定分析节点数量，自动确定单个分析节点的资源；3) TP 侧通过 RDMA 直接写内存池中的 Delta Store, Delta Store 可立刻处理分析业务的读请求，不影响交易性能，又将 AP、TP 数据时延稳定控制在 1ms 以内；4) 在行式存储引擎和列式存储引擎上建立全局的一致性事务视图，单条 SQL 可以横跨行存和列存；5) 智能混合优化器，智能化判断 SQL 仅在 TP 引擎上执行、仅在 AP 引擎上执行、在 TP&AP 引擎上联合执行，实现语句级 TP&AP 引擎协同执行。

3. 智能弹性，实现更细粒度、更精准的资源调度

Serverless 数据库未来还需要具备智能弹性的能力，能够根据用户的历史负载计算出用户特征描述，快速判断未来的负载曲线，提前为弹性伸缩准备好资源，避免负载冲击到资源规格上限，减少系统资源浪费，追求更极致的弹性。

其中的关键技术包括：智能检测业务负载趋势，预测资源消耗，基于服务等级协议保障，动态调整数据库资源纵向扩展，加减实例横向扩展；数据库内核基于业务负载动态调整内核多种参数包括线程池大小、连接数、等待时延等；基于分布

式共享内存的扩展缓存池、锁、事务状态，以及元数据管理等，实现数据库全局状态管理；也可以采用轻量化容器技术，提升系统的启动时间以及高密度部署。

4. 全场景智能数据库，发挥 AI 与数据库的融合价值

2019 年，华为首次发布了 GaussDB AI-Native 技术，并持续将 AI 技术融入数据库内核、核心算法和数据结构，实现数据库自动优化和调优等功能。同时，GaussDB 还在分布列推荐、慢 SQL 发现与诊断、负载趋势预测与异常检测等领域，引入 AI 技术，大幅提升管理效率，让数据库管理更加智能高效。

未来，云原生数据库将持续与 AI 内外协作，向全场景智能数据库迈进。全场景智能数据库包含两个方面：一是 AI for DB（见图 17），让数据库管理更加智能高效。具备自检测、自诊断、自调优、自运维及自安全的能力，覆盖数据库全生命周期的管理与优化。核心组件包括支撑平台及服务平台，支撑平台用于采集分析数据支持上层服务；服务平台提供智能化的运维管理服务。全场景智能 DB 在 AI for DB 上将从专家经验或者规则，走向全模块智能化。



图 17 AI for DB 示意图

二是 DB for AI (见图 18)，提供库内 AI 引擎。库内全流程 AI 框架，数据不出库，端到端完成数据清洗、特征工程、模型选择和模型训练，安全可靠、简单高效；库内原生支持常用 AI 算子，满足绝大部分机器学习使用场景。全场景智能 DB 在 DB for AI 上将从 SQL 扩展到原生 SQL，从单点功能调用到全流程自动处理。

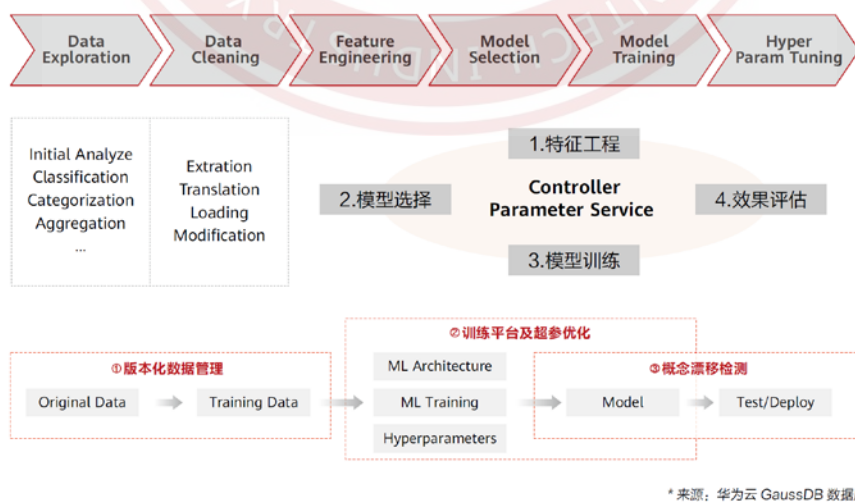


图 18 DB for AI 示意图

5. 结合全密态和防篡改技术，保障云上数据安全

云原生数据库部署环境由封闭式私有环境向开放式公有云服务环境演变，数据库面临的威胁挑战也越来越多，数据安全隐私问题愈发凸显。针对传统的数据传输安全、数据存储安全、数据运维安全以及面向最终用户的数据显示安全等问题，当前云原生数据库产品提供了多种技术来保障数据的安全隐私，如安全传输通道、权限访问控制、数据存储加密及数据动态脱敏等。然而，数据运行态（查询计算）在缺乏有效保护手段的情况下，攻击者和恶意 DBA 仍然可以通过内存抓取来获取用户隐私数据，容易造成隐私泄露等安全问题。同时，可能存在恶意的篡改数据、擦除痕迹、难以有效跟进的问题。未来，云原生数据库也将结合当下迅猛发展的全密态和防篡改技术，提升数据可信存储与可信维护能力，保障数据全流程的安全。

全密态数据库通过支持密文形态下的数据查询和计算，使得攻击者在获取内存数据后仍然无法解析出有效的明文信息，更重要的是，数据加解密所需的密钥均由最终用户持有，可以有效地解决第三方信任问题。一种实现方式是构建纯软形态的全密态数据库解决方案，提供分布式密文数据处理能力，在服务侧实现多种密文数据查询纯软算法；另一种是结合云基础设施提供的可信硬件（TEE）实现软件和硬件结合的密态数据处理

技术，密文数据每次依据查询要求将指定的密文“传送”至 TEE，然后在 TEE 内完成数据解密和查询计算，充分提高系统整体效率，云原生数据库更适合第二种技术路线。

防篡改数据库在技术层面通过去中心化的分布式账本数据库、分布式数据存储、P2P 网络技术、共识机制、加密算法等，实现融合区块链特质的防篡改能力。第一阶段是做到单中心账本，对防篡改用户表进行操作，系统会在对应的用户历史表中记录行级数据变化，并通过密码学算法逐行生成校验码。通过校验码逐行验证用户历史表可保证用户表不被篡改；第二阶段是多方链上协同事务，多集群形成联盟链，每个集群均有全量数据，对防篡改用户表执行操作均需同步到链上所有集群，并使用公式算法校验执行结果。当前云原生数据库已初步具备第一阶段能力，将继续往第二阶段探索。

（二）金融行业数据库技术应用的建议

1. 建设标准体系，引领金融行业数据库技术发展

标准化在推动金融科技发展和金融治理能力现代化中发挥着基础性、引领性作用。建议金融行业在金融管理部门指导下，加快推动数据库金融应用系统标准体系建设。工行作为北京金融科技产业联盟分布式数据库专业委员会主任单位，一直以来坚持“金融科技应用先进可控”的工作目标，积极统筹规

划，牵头组织研制分布式数据库金融应用标准规范，从技术架构、安全防护、灾难恢复等方面确定金融行业标准要求，联合金融同业和科技产业共同推动数据库产业生态发展。

面对数据库领域的高速发展，金融行业数据库应用未来主流技术路线存在不确定性，金融行业应加强数据库应用开发规范指引的完善与落实，严控新增应用模块使用特定数据库产品专有特性，引导应用随业务重构向着标准化方向演进，逐渐实现金融应用系统与特定数据库技术栈解耦，为未来 IT 架构发展保留灵活性，避免重复迁移改造。

2. 促进产用对接，推动产业生态发展成熟

依托北京金融科技产业联盟，10 余家人行相关机构、80 余家金融机构、140 余家金融科技公司及相关服务厂商、10 余家科研院所联合组建分布式数据库专业委员会，共同促进分布式数据库产业发展成熟，加快推动分布式数据库在金融领域的技术攻关和应用落地，结合金融业务转型需求，为数据库新产品新技术提供金融级实战场景和实施案例，加快实现关键核心技术重大突破。

近年来，多款商业分布式数据库产品宣布开源，引发广泛关注。开源作为软件构建和生态培育的一种重要方式，有助于用户广泛参与到产品反馈和创新，促进产品的成熟和生态的发

展，在推动金融机构数据库转型方面也起到了积极作用。

3. 加强人才培养，激发金融行业创新活力

人才是创新发展的第一动力。金融行业需加强数据库专业人才的培养，通过创新人才激励机制，深化与国家战略科技力量的产学研用联合创新，加强和高校等科研机构的人才培养合作，全方位建设金融行业数据库技术人才资源池，为数字化转型健康发展提供保障和动能。

当前宏观经济环境发生深刻变化，数据库等基础信息平台面临跨越式发展历史机遇，金融行业也正处于数字化转型关键时期。“道阻且长，行则将至。”愿金融同业及科技产业携手前行，共建标准体系，加强应用创新与技术创新的循环驱动，促进数据库关键技术成熟完善，赋能金融行业数字化转型。

参考文献

- [1] 中国人民银行. JR/T 0203—2020 分布式数据库技术金融应用规范 技术架构. 国家标准.
- [2] 中国人民银行. JR/T 0204—2020 分布式数据库技术金融应用规范 安全技术要求. 国家标准.
- [3] 中国人民银行. JR/T 0205—2020 分布式数据库技术金融应用规范 灾难恢复要求. 国家标准.
- [4] 中国人民银行. 金融科技 (FinTech) 发展规划 (2019—2021 年). 中国人民银行印发.
- [5] 中国人民银行. 金融科技 (FinTech) 发展规划 (2022—2025 年). 中国人民银行印发.