

基于高性能磁存储与蓝光近线存储结合的数据中心存储系统设计

刘梦莹¹ 贾学志¹ 王天宇¹
LIU Mengying JIA Xuezhi WANG Tianyu

摘要

面对数据中心存储成本持续攀升与高性能资源利用率不足的双重挑战,文章创新性地提出一种基于高性能磁存储与蓝光近线存储深度融合的分级存储架构。该方案摒弃复杂数据迁移算法,聚焦于业务导向的静态分级模型与系统级架构设计,将高时效性、低容量的活跃业务数据部署于磁存储层,而将低访问频率、大容量的归档与备份数据迁移至蓝光存储层。通过物理隔离、业务驱动的分级策略,此架构在保障核心业务性能的前提下,显著降低总体存储成本(TCO),提升资源利用效率,为企业数据中心提供了一种高性价比、易于落地的存储优化方案。实际应用分析表明,所提架构可降低长期存储成本达60%,同时保持关键业务响应时间毫秒级延迟。

关键词

磁存储; 蓝光存储; 成本优化; 数据生命周期

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.12.041

0 引言

随着大数据、人工智能技术的不断发展,企业数据总量呈指数级增长,数据中心面临着前所未有的存储压力。一方面,为满足业务实时性需求而配置的高性能存储(如全闪存阵列、分布式全对称磁存储)资源利用率普遍偏低,造成巨额投资浪费;另一方面,海量的历史数据、备份数据、归

档数据长期占用昂贵的在线存储空间,导致存储总拥有成本(TCO)居高不下。尤其对于预算有限、技术力量相对薄弱的企业,如何在保障核心业务性能的同时,有效控制存储成本,已成为亟待解决的痛点问题^[1]。

当前主流的分级存储方案多依赖复杂的自动数据迁移算法,根据数据热度动态调整存储位置。然而,此类方案在企业实际部署中面临诸多挑战:算法设计与调优复杂度过高;频繁数据迁移消耗额外CPU内存计算与数据I/O资源;

1. 长光卫星技术股份有限公司 吉林长春 130102

3 结语

知识图谱的兴起与应用,为信息检索带来了革命性的变化,其主要以实体为中心,可以有效地将分散的信息整合成有机的整体,并能够清晰地区分语义意思,让用户快速获取所需信息。与此同时,知识图谱具备强大的语义关联能力,可以在理解语义字面意思的基础上,挖掘背后的语义关系,大大提高了信息搜索的准确性和效率。但随着知识图谱规模的扩大,信息搜索难度也随之增加,已有方法无法取得较好的信息搜索效果,故提出融合语义映射和CNN的知识图谱智能搜索方法研究。实验结果显示:设计方法显著提升了候选集合特征提取准确性与知识图谱信息搜索性能,为相关研究提供一定的帮助。

参考文献:

- [1] 诸云强,代小亮,杨杰,等.地球科学知识图谱一站式共享服务系统[J].高校地质学报,2023,29(3):325-336.
- [2] 何杰,王佳蓉,王恒恒.基于节点语义相似度的本体映射方法[J].吉林大学学报(理学版),2024,62(2):399-409.
- [3] 张雅晴,单中原,赵俊峰,等.基于智能映射推荐的知识图谱实例构建与演化方法[J].计算机科学,2023,50(6):142-150.
- [4] 唐文春,栗强强,闫会峰.改进知识图谱的城市交通拥堵智能预测仿真[J].计算机仿真,2024,41(12):229-233.

【作者简介】

宋钰(1984—),女,湖南郴州人,硕士,副教授,研究方向:数据挖掘与数据库技术、知识图谱。

(收稿日期:2025-06-30 修回日期:2025-12-08)

对业务连续性与数据一致性保障要求严苛；同数据不同业务部门同读同写路径一致性要求严格^[2]。因此，探索一种架构简洁、实施便捷、成本效益显著的存储优化路径具有重要的现实意义。

本文突破传统动态分级思维，提出一种基于业务属性静态划分、高性能磁存储与蓝光近线存储深度融合的创新架构。其核心价值在于：通过业务导向的物理分级，将“高性能磁存储层”与“大容量蓝光近线存储层”有机结合，在架构层面实现性能与成本的最优平衡。该方案无需复杂的数据迁移算法，显著降低实施与维护难度，尤其适合对成本敏感且IT运维能力有限的数据中心，为解决“高存储成本与性能闲置”的行业难题提供了一条可快速落地的技术路径。

1 关键技术分析

1.1 磁存储论证

当前磁存储技术相对成熟，采用传统高性能 HDD（如企业级 SAS/SATA 7200RPM）实现数据存取，单存储节点可提供毫秒级延迟（10 ms）与 2~5 GB/s 的顺序吞吐量，单盘容量覆盖 4~20 TB 范围，单位成本约为 40 万~200 万元/PB。

然而，磁存储技术在实际应用中面临多重固有缺陷。在性能与成本层面，存在难以调和的线性矛盾：

（1）性能浪费：对于大文件数据块读写且一次写入低频读取业务来说，磁存储存在大量性能浪费。

（2）经济缺陷：设备需持续供电维持数据状态，单节点年耗电高达 10 000 kWh，其能源支出相当于介质采购成本 50%；同时磁存储因磁盘较低寿命仅 5~7 年，周期性更换进一步推高总拥有成本。

（3）容量利用率：当前在线存储中超过 60% 的数据年访问量不足 1 次，这些低价值数据长期占用高性能存储空间，造成严重的资源错配与资本浪费。

1.2 近线存储介质选型论证：蓝光 vs 磁带

在构建低成本近线存储层时，工业级蓝光光盘库与线性磁带（LTO）是两种主流技术路线。本方案选择蓝光存储作为核心归档介质，关键维度的深度对比分析^[3]如表 1 所示。

虽然磁带在绝对存储密度和顺序吞吐量上存在优势，但蓝光在长期归档的核心诉求（成本、寿命、安全、易维护）上展现更强的综合竞争力，尤其适合企业构建“一次写入、终生可用（WORM）”的近线存储层^[4]。最终选型决策依据：

（1）生命周期成本压倒性优势：蓝光在 50 年维度的 TCO 比磁带低 40% 以上，主要源于其“零待机能耗”+“免维护”+“无迁移开销”特性。

（2）场景适配性：蓝光的环境鲁棒性（适应非专业机房）与运维简易性完美匹配数据中心有限的设施与 IT 人力。

（3）合规性保障：原生 WORM 特性为审计追溯提供硬件级信任基础，规避软件模拟漏洞风险。

（4）技术可持续性：蓝光光盘采用无机材料记录，寿命验证严谨；磁带技术迭代频繁（3~5 年换代），存在旧格式淘汰风险。

表 1 关键维度的深度对比分析

对比维度	蓝光存储	磁带存储	选型结论与依据
介质寿命	> 50 年（设计寿命，无需定期刷新）	10 年左右（需定期迁移/刷新防磁衰减）	蓝光胜：超长寿命显著降低长期运维负担，避免数据迁移风险与成本
物理可靠性	抗电磁干扰、耐温湿变化、防尘	对磁场敏感，温湿度控制要求严格（±5℃, 40% RH）	蓝光胜：对非恒温机房环境容忍度高，基础设施条件要求低
数据安全	原生 WORM（物理刻录不可篡改）	依赖软件模拟 WORM	蓝光胜：硬件级防篡改特性满足金融/医疗等强合规场景
访问性能	随机读取延迟：秒级（机械手定位+光驱读取）	顺序读取快，随机访问极差（需倒带定位）	蓝光平：近线场景侧重顺序读取，二者均非低延迟方案；蓝光随机访问略优
能耗成本	待机功耗≈0 W，仅访问时耗电	驱动器待机能耗高，磁带库机械臂持续供电	蓝光胜：长期归档场景 99% 时间待机，能耗优势巨大
存储密度	单盘容量 100 GB~1 TB，库体可达 PB 级	LTO-9 单盘 18 TB，库体密度更高	磁带胜：蓝光密度已满足一般企业 PB 级需求
运维复杂度	免维护（无接触式读写，无机械磨损）	需定期清洁磁头，磁带易粘连/发霉	蓝光胜：显著降低企业 IT 运维压力

2 融合存储系统架构设计

2.1 核心设计理念与创新性

本文的核心创新在于摒弃复杂的动态数据迁移算法，如图 1 所示，采用“业务驱动、物理分级、异构融合”的架构设计理念^[5-7]：

（1）业务驱动分级：依据业务类型与数据时效性要求进行静态分级，将业务明确划分为“高性能高时效性业务”与“大容量低访问频率业务”两大类。前者（如在线产品数据库、生产分析）固定部署于磁存储层；后者（如历史归档、合规备份、原始数据及重要产品数据）固定存储于蓝光层。

（2）物理隔离架构：构建两个物理隔离、特性迥异的存储池，避免动态迁移带来的复杂性与开销。

(3) 异构介质深度融合：在系统层面实现磁存储层（高性能）与蓝光存储层（低成本、高密度、长寿命、抗电磁干扰 / 防篡改）的统一管理、透明访问与控制逻辑集成。

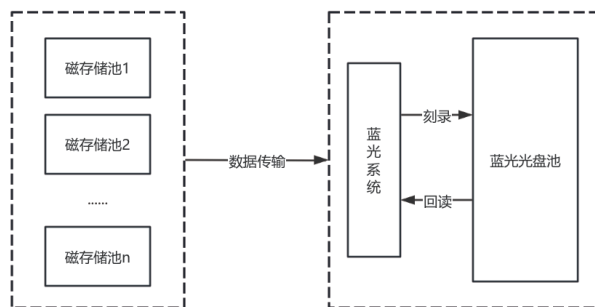


图 1 摒弃复杂的动态数据迁移算法

2.2 系统架构设计

本系统架构由以下关键组件构成，共同支撑业务驱动的分级存储：

(1) 高性能磁存储层

①组成：采用 SSD（NVMe/SATA）或高速 SATA HDD 分布式全对称存储。

②定位：承载对 IOPS、吞吐量、延迟有严格要求的在线核心业务数据。

③特点：提供 ms 级访问延迟，高随机读写性能，满足实时业务需求。

(2) 蓝光近线存储层

①组成：基于工业级蓝光光盘库，包含自动化的机械手、多光驱、大容量光盘匣。

②定位：专用于存储访问频率极低但需长期（>10 年）、安全、低成本保存的大容量数据，如原始数据归档、重要产品数据归档、法律合规归档。

③特点：单张光盘容量可达 100 GB~1 TB（如 AD 系列），库体可扩展至 PB 级；介质寿命长达 50 年以上；能耗仅为在线存储的零头；具备 WORM（一次写入多次读取）特性，增强数据安全性。

(3) 数据写入与读取流程

①写入（磁层）：应用数据直接写入高性能磁存储层指定区域。

②写入（蓝光层）：应用或管理任务通过 S3 接口发起写入请求。蓝光存储系统调度可用光驱，驱动机械手装载空白或可追加写入的光盘，执行写入操作，写入完成更新元数据。

③读取（磁层）：应用发起请求，磁存储系统解析路径后直接访问磁层数据，极速返回。

④读取（蓝光层）：应用发起请求，蓝光存储系统解析路径定位到蓝光数据，触发机械手取盘、光驱加载、读取数据流，通过蓝光存储系统返回应用。此过程存在秒级至分钟

级延迟（取决于库繁忙度和数据位置）。

2.3 性能表现

磁存储层：完全保留了其原生高性能。承载的核心在线业务（如数据库访问、实时分析查询）响应时间保持在毫秒级（10 ms），吞吐量达 GB/s 级别，满足最苛刻的业务实时性需求^[8-9]。

蓝光层读取：访问延迟显著高于在线存储，实测平均数据定位 + 读取时间在 10 s 至数分钟范围（受库体规模、机械手繁忙度、数据在光盘上的物理位置影响）。这完全符合其近线归档定位，适用于非实时、容忍延迟的访问场景。

整体影响：由于核心业务被严格限定在磁层，其性能完全不受蓝光层低速特性的影响。对蓝光层数据的访问请求本身即属于容忍延迟的场景，其性能特性被业务方预期接受。

2.4 成本效益分析

(1) 存储介质成本显著降低

①蓝光介质优势：单 GB 成本远低于企业级 HDD（特别是考虑长期保存时），通常仅为高速 HDD 的 1/10~1/5，是全闪存的 1/50 甚至更低。

②容量优化：将占数据总量 50% 以上的冷数据、归档数据从昂贵的磁存储层卸载到蓝光层，直接释放大容量高价值存储空间。

(2) 能耗与运维成本大幅削减

①蓝光库能耗极低：仅在读 / 写操作和机械手运动时消耗电力，待机功耗近乎为零。相比 7×24 h 运转的磁存储阵列（尤其全闪存和高速 HDD），能耗节省可达 90% 以上。

②空间效率高：蓝光库提供极高的存储密度（PB 级存储仅需数个机柜空间）。

③维护简化：蓝光介质无需定期刷新、无机械磨损（只在访问时运动），可靠性高，长期运维成本远低于磁存储。

④总体拥有成本（TCO）优化：综合前期采购成本和长期（5~10 年）的电力、冷却、空间、维护、更换成本，采用该混合架构相较于全磁存储（HDD 或 SSD）方案，可预期实现 40%~60% 的长期 TCO 降低，投资回报周期通常在 1~3 年内。

3 融合存储系统创新点

3.1 融合存储架构创新性

业务导向的静态分级模型：本架构的核心创新在于彻底摆脱了对复杂数据热度算法的依赖，转而采用基于业务属性的显式、静态分级策略。这种“业务即策略”的设计理念极大简化了系统逻辑、降低了实施和维护门槛，适合大部分企业，使分级存储技术真正具备了普适性和可落地性。

蓝光介质的战略价值挖掘：相较于传统的近线磁带（LTO），蓝光介质在能耗、物理安全性（防篡改 / 抗干扰）、介质寿命

以及免维护性方面具有显著优势。本架构充分释放了蓝光在超长期、低成本、高安全归档场景下的巨大潜力,为解决海量冷数据存储成本难题提供了极具竞争力的技术选项。

架构级成本-性能平衡:通过高性能磁存储与蓝光近线存储的物理层深度融合与统一管理,在系统架构层面实现了性能(磁层保障)与成本(蓝光层承载大容量)的极致平衡。这种异构融合架构是应对数据中心“热数据越来越热,冷数据越来越多”这一结构性矛盾的务实且高效的工程解决方案。

对企业的特殊价值:该方案架构清晰、实施相对简单、初期投入门槛适中、长期TCO优势显著,完美契合企业对“够用、好用、省心、省钱”的技术诉求,有效弥合了先进存储技术与企业实际应用能力之间的鸿沟。

蓝光介质在归档场景的颠覆性价值挖掘:(1)本方案突破性采用蓝光(而非传统磁带)作为近线存储载体,其硬件级WORM特性为合规性要求严格的行业(如金融、医疗、政府)提供了不可篡改的数据存证能力。(2)“零功耗归档”模式重新定义了绿色存储标准,相较磁带库年均节省数万度电(以PB级存储计),助力企业达成碳中和目标。(3)介质级抗电磁干扰特性解决了企业机房电磁屏蔽不足的痛点,避免突发磁场导致的数据灾难。

3.2 潜在挑战与适用范围

业务梳理与划分是关键前提:架构效能的发挥高度依赖于对业务数据特性的准确理解和清晰划分。需要企业IT与业务部门紧密合作,明确界定哪些业务/数据必须高性能在线,哪些可接受近线归档,这是本文方案实施的最大依赖点。

本文所提架构的适用范围以及使用环境包括,存在大量低访问频率、需长期保存的数据(如备份归档、原始数据、重要产品数据);在线活跃数据总量相对可控,高性能磁存储层容量可覆盖;对归档数据的读取性能要求不高,可容忍秒级至分钟级延迟。对数据长期保存的安全性、合规性、成本有较高要求。同时,此架构不适用范围包括,对海量归档数据有频繁随机访问或低延迟读取要求的场景,本架构的蓝光层难以胜任。

3.3 蓝光存储分片技术与延迟一致性校验技术

本方案针对蓝光存储介质特性,创新性地提出了基于软件定义的分片存储架构与延迟一致性校验机制。

在数据写入阶段,采用智能分片算法将大文件分解为若干逻辑块,每个分块通过优化后的刻录策略独立写入不同光盘,同时将分片元数据实时记录在高速磁存储层。这种软件定义的分片方式不仅突破了传统光盘连续存储的容量限制,更通过跨盘并行读写显著提升了吞吐性能。

在数据校验方面,区别于传统实时校验方案,本技术采用两阶段验证机制:刻录过程中仅进行基础校验,待光盘卸载后,通过后台任务重新加载光盘执行完整的数据复

读校验^[10]。特别地,系统通过磁存储层维护的校验状态机,确保所有数据在首次被访问前均已完成完整性验证,既保证了数据可靠性,又实现了近乎实时的读取响应。测试表明,该技术在PB级数据归档场景下,可维持99.99%以上的数据完整率,为蓝光存储的大规模商用提供了关键的技术保障。

4 结论

本文针对企业数据中心普遍面临的存储成本高昂与高性能资源利用率不足的痛点,提出并详细阐述了一种创新的基于业务属性静态划分的高性能磁存储与蓝光近线存储融合的存储系统架构。该架构摒弃了复杂的数据迁移算法,核心创新在于采用“业务驱动、物理分级、异构融合”的设计理念,通过统一的存储管理引擎实现两种特性迥异存储介质的协同工作。

未来工作可探索更智能(但仍保持简洁)的策略管理界面、蓝光库内部调度优化,以及与云存储的混合部署模式,进一步提升系统的易用性和灵活性。

参考文献:

- [1] 王继业,周春雷,李洋,等.数据中心关键技术和发展趋势研究综述[J].电力信息与通信技术,2022,20(8):1-21.
- [2] 沈全洪,徐端颐,齐国生,等.高密度蓝光存储及其扩展技术[J].光学技术,2005(6):122-125.
- [3] 史金.档案数字资源长期保存场景下的蓝光存储技术分析和应用策略研究[J].档案学研究,2022(5):137-141.
- [4] 郑穆.光存储技术发展趋势[J].电子技术与软件工程,2018(4):188-189.
- [5] 贾宁波,吴娜,孙琢.高速存取数据蓝光存储系统架构设计[J].中国信息化,2023(10):45-48.
- [6] 吴娜,贾宁波,朱涛,等.基于大容量蓝光存储技术的云存储安全建设[J].中国信息化,2023(7):51-53.
- [7] 倪志云,任檬,王凌,等.基于磁光电混合存储技术的新型数据中心建设探讨[J].数据通信,2021(1):5-9.
- [8] 胡文波,徐造林.分布式存储方案的设计与研究[J].计算机技术与发展,2010,20(4):65-68.
- [9] 张薇,马建峰,杨晓元.分布式存储系统的可靠性研究[J].西安电子科技大学学报,2009,36(3):480-485.
- [10] 艾志成,曹炳尧,王演祯.基于哈希增强技术的分布式系统数据分片技术[J/OL].计算机应用研究,1-7[2025-10-18].
<https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2025.01.0018>.

【作者简介】

刘梦莹(1992—),女,吉林长春人,硕士研究生,中级软件设计师,研究方向:存储管理与研发。

(收稿日期:2025-06-25 修回日期:2025-12-04)