

面向智算场景的存储解决方案研究

Research on Storage Solutions for Intelligent Computing Scenarios

申 佳¹,童俊杰²,张 奎¹,刘千仞¹,张世华¹(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司,河南 郑州 450007;2. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033)

Shen Jia¹,Tong Junjie²,Zhang Kui¹,Liu Qianren¹,Zhang Shihua¹(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co.,Ltd. Zhengzhou Branch,Zhengzhou 450007,China;2. China United Network Communication Group Co.,Ltd.,Beijing 100033,China)

摘 要:

随着人工智能的快速发展和应用,传统的数据存储方案在容量、性能和可扩展性方面难以满足智算数据中心的需求。分析了大规模智算数据中心训练推理各阶段对存储的需求,结合现网数据存储架构能力,提出一种新的数据存储解决方案,以满足智算场景对数据存储容量、性能和成本的要求。

关键词:

人工智能;数据存储;并行文件系统

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.02.012

文章编号:1007-3043(2026)02-0061-06

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:

With the rapid development and application of artificial intelligence, traditional data storage solutions are unable to meet the needs of intelligent computing data centers in terms of capacity, performance, and scalability. It analyzes the storage requirements for training and inference in large-scale intelligent computing data centers at various stages. Based on the existing network data storage architecture capabilities, a new data storage solution is proposed to meet the requirements of intelligent computing scenarios for data storage capacity, performance, and cost.

Keywords:

Artificial intelligence; Data storage; Parallel file system

引用格式:申佳,童俊杰,张奎,等. 面向智算场景的存储解决方案研究[J]. 邮电设计技术,2026(2):61-66.

1 概述

近年来,人工智能快速发展,特别是以 Sora 为代表的大模型的出现,能够从文本、图片、音频、视频等多模态数据中进行训练学习,进而生成高质量的视频,预计将带来几何倍增规模的人工智能算力需求^[1]。各种新兴应用场景和随之而来的海量数据对数据存储系统的容量、性能、可靠性和数据流动性等方

面提出了更高的要求。为承接上述爆发式增长的算力需求,运营商正加速布局大规模智算中心。数据存储(即存力)作为与算力、运力并列的三大核心能力之一^[2],其高效稳定运行保障机制已成为当前的重要研究课题^[3-4]。

研究智算中心数据存储方案是为了满足大规模智算中心算力对海量数据存储和处理的需求,同时提高数据存储方案的可靠性,进而降低智算中心训练中断的概率,保障智算训练服务器平稳高效运行,提高投资产出效益。

收稿日期:2025-12-30

由于应用场景繁多,不同场景对数据存储解决方案的要求也存在差异,本文将从运营商智算数据中心大模型训练推理业务入手,分析数据存储面临的挑战,并提出可行的数据存储解决方案。

2 传统数据存储方案

传统数据存储解决方案可以分为集中式存储和分布式存储两大类。

集中式存储历经了较长时间的发展,其机头控制器采用部件冗余架构进行设计,结合磁盘 RAID 技术和增值特性如快照、远程复制、双活等,系统可靠性可达 99.999%。在性能指标方面,如 IOPS、时延等,集中式存储表现优秀,适用于对性能、可靠性要求较高的核心业务场景。但受集中式架构设计的限制,该方案的扩展范围通常在 16~64 个机头,单套存储最大容量通常建议在十余 PB,难以满足更大规模的智算、超算和大数据业务场景需求。集中式存储架构示意如图 1 所示。

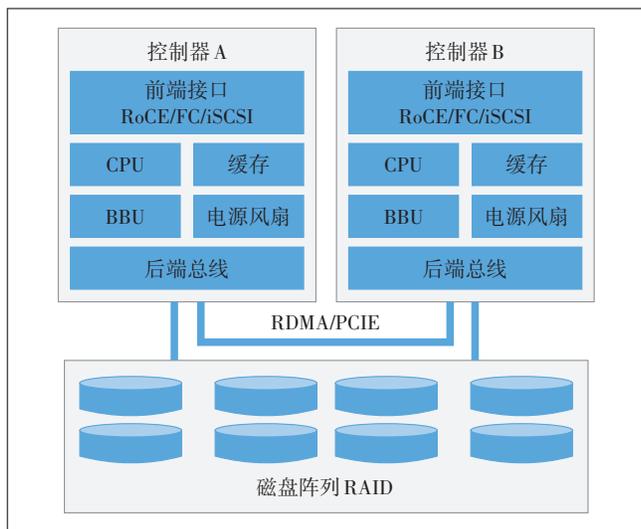


图 1 集中式存储架构示意

受非结构化数据业务的驱动,分布式存储发展迅速,通常由去中心化的多个存储节点组成,具备更好的扩展性和更大的容量,业界厂商称单套分布式存储节点可达数百甚至上千个,提供上百 PB 甚至 EB 级别的容量。同时,主流分布式存储能够提供块、文件、对象和大数据访问协议,支撑更多不同类型的应用,在大数据、视频、备份归档等场景使用较多。但分布式存储数据的读写涉及不同节点间的网络通信,其时延指标通常比集中式存储高,对时延敏感的核心业务需

进行综合考虑^[5]。分布式存储架构示意如图 2 所示。

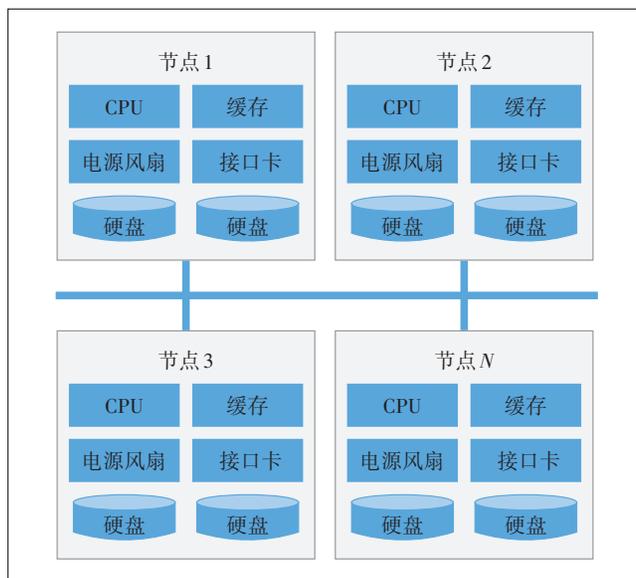


图 2 分布式存储架构示意

3 智算对数据存储的需求

智算数据中心大模型训练推理业务可分为 4 个阶段:数据归集、数据预处理、大模型训练和大模型推理应用,不同业务阶段处理的数据 IO 特征和对数据存储的要求不尽相同(见表 1)^[6]。

表 1 大模型训练推理流程及对数据存储需求

阶段	数据归集	数据预处理	大模型训练(数据加载)	大模型训练(Check-Point)	推理应用
描述	数据采集和导入,包括训练数据、网络爬虫数据等	对原始数据进行训练前的预处理,包括数据清洗、标注等	加载预处理后的训练数据	周期性过程数据保存,用于断点训练	利用训练好的模型进行预测
IO 特征	读写比例: 100% 写,顺序写 IO	读写比例: 50% 读,50% 写,顺序 IO,随机小 IO	读写比例: 95% 读,5% 写,大小混合,随机 IO	读写比例: 100% 写或读,大 IO 顺序写或读	读写比例: 95% 读,5% 写,大小混合,随机 IO
存储需求	支持文件、对象协议,大容量、高带宽	支持文件、对象协议,大容量、高带宽	支持高并发文件协议,高 IOPS	支持高并发文件协议,高带宽	低时延

a) 数据归集。在数据归集阶段,需要采集导入不同来源、格式和用途的原始数据,包括客户的、从第三方收集的和网络爬取的原始待训练数据。首先,数据存储需提供便捷的网络访问方式,支持多数据协议,如对象、文件等非结构化类型数据。其次,原始训练

数据的数据量庞大,如LLaMA2(NLP)的原始训练数据约为513 TB、盘古小艺约为2 PB、Sora多模态大模型已达到EB级别,这就要求数据存储能够提供较大的存储空间。最后,导入的数据涉及不同类型和大小的文件,其IO模型属于100%顺序写,因此需要数据存储提供较高的写入带宽,以便缩短数据导入时间^[7]。

b) 数据预处理。在此阶段需要对海量的原始数据进行清洗、转换、增强、标准化等操作,涉及多样预处理工具,需要数据存储支持多数据访问协议,如对象存储和文件存储。同时,由于数据生成成本高,预处理过程中需要保存中间态数据,会产生大量数据膨胀,需要大容量共享的数据存储池。在预处理过程中,LLaMA2数据膨胀约4倍,达到2 PB,盘古小艺数据膨胀15倍,达到30 PB。另外,在数据预处理阶段,IO模型约为50%读和50%写,涉及顺序IO和随机小IO,要求数据存储不但具备高带宽,还要提供较高的IOPS。

c) 大模型训练。训练阶段主要有训练数据加载和周期性Checkpoint保存2种操作。训练数据加载操作以文件类型的数据为主,根据训练模型的不同,NLP模型每批次数据量约为几百KB,而视频等多模态大模型每批次数据量约为上百MB甚至几十GB,总体加载数据量达到TB甚至PB级别。其IO模型也不同,如图像IO大小随机,而文本和视频通常是顺序大IO,对数据存储提出极高的IOPS要求。周期性Checkpoint保存通常涉及几十GB至上百TB数据的保存,也有训练中断重新加载Checkpoint继续训练的场景,通常业界建议在2 min内完成Checkpoint的操作,这就要求数据存储提供的带宽越高越好。

d) 推理应用。推理应用阶段对数据存储最突出的要求是提供极低的时延,以便快速应答,同时保存推理数据和结果,以供模型持续优化。

综上所述,智算数据大模型训练推理场景对数据存储的要求更高,必须满足智算场景海量数据存储的基本要求,也要满足训练过程中数据访问所需的高带宽和高IOPS以及推理阶段的低时延要求。另外,数据存储的可靠性也是基本要求,任何故障导致的训练中断都会造成较高的计算资源浪费。传统的集中式存储无法满足海量数据存储和高扩展性要求,分布式存储难以满足高并发文件访问、低时延要求,而智算场景需要同时满足高并发、高带宽、低时延、高扩展性要求的数据存储解决方案。

4 智算数据存储解决方案

综合智算数据中心训练推理业务各阶段对数据存储的容量、性能、可靠性、数据流动和成本的要求,本文提出一套分层的数据存储解决方案。

4.1 数据存储方案选型

国内运营商单体智算数据中心规划建设规模已达上千PFLOPS,而国外大模型训练数据中心算力则高达EFLOPS。业界不同类型的大模型训练对数据存储容量的需求在几十PB至上百PB,而传统的集中式存储受限于控制器的计算能力,容量扩展性有限,业界最佳实践推荐的单套最大容量在十几PB,难以满足大规模智算中心对数据存储容量的要求。因此,在大规模智算数据中心场景,建议首选分布式存储解决方案,以满足海量数据存储的容量需求以及随算力增加而扩展的需求。

4.2 高性能层并行文件存储

高性能层并行文件存储选择的分布式存储解决方案,在满足大容量要求的同时,还需满足训练阶段对数据存储提出的高并发文件访问、高带宽、高IOPS要求,其系统逻辑架构如图3所示。高性能层并行文件存储由支持高并发的并行文件系统和高性能存储硬件组成,两者通过高性能无损网络连接通信。

4.2.1 并行文件系统

高性能层并行文件系统主要用于智算数据训练阶段的预处理数据加载和Checkpoint保存。与传统的NFS/CIFS文件共享系统相比,该系统最大的优势为其机制支持多客户端并行访问不同节点的数据。在并行文件存储中,多个节点可以并行读写,整个并行文件系统读写的带宽可以随着节点的增加而增加,进而聚合并提供大带宽能力^[6,8]。传统NFS文件系统与并行文件系统数据流示意如图4所示。

高性能并行文件系统通常有2种方案,一种是以华为、DELL/EMC为代表的专业存储厂商方案。该方案由存储厂商提供软硬件一体的文件存储解决方案,通常在文件系统软件层实现各节点EC数据冗余机制以保障数据安全,适用于没有数据存储软件研发能力或者研发能力较弱的单位。另一种方案是采用并行文件系统存储软件,或者基于业界成熟的Lustre、GPFS等开源并行文件系统进行增强优化,底层硬件选择Diskless架构的专业存储,如DDN基于Lustre开发的针对智算场景的存储解决方案。此方案在存储硬件节

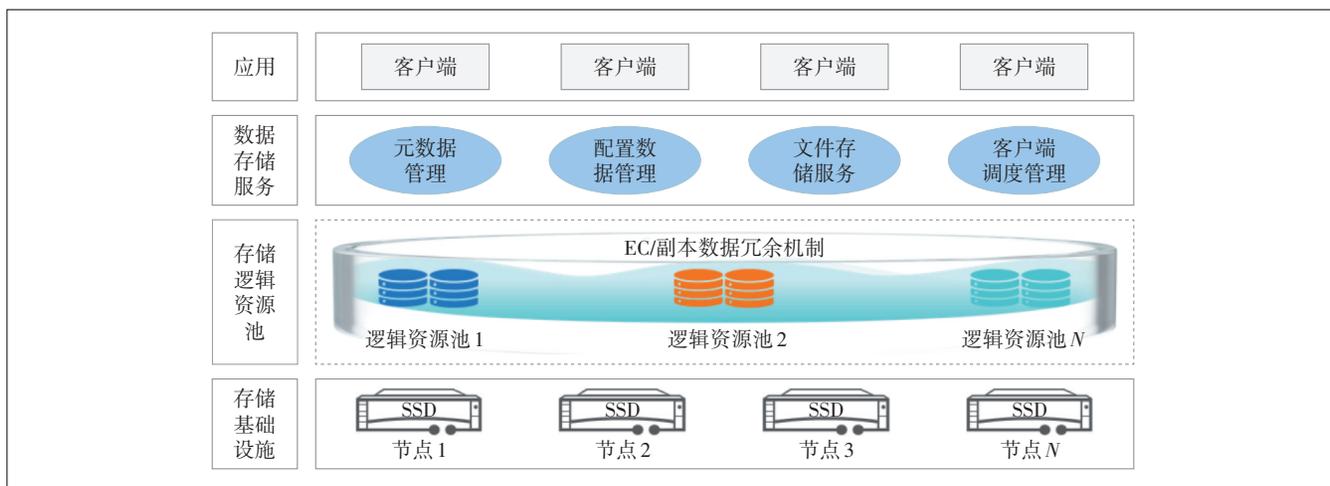


图3 高性能层并行文件存储架构

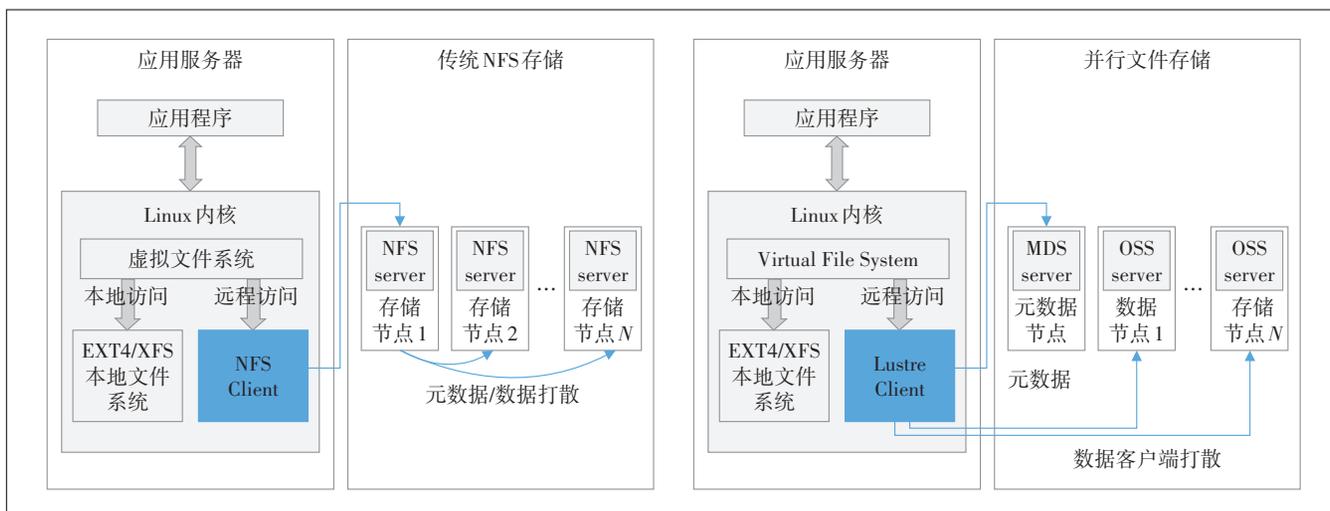


图4 传统NFS文件系统与并行文件系统数据流示意

点内实现EC数据冗余机制,在并行文件系统软件层实现集群统一管理,既能获得专业存储厂商高可靠的硬件和EC数据冗余机制,又能实现软硬件解耦,获得Diskless架构存算分离、降低投资、便于后期维护等收益。

综合Diskless架构的并行文件系统的优势以及高性能计算领域并行文件系统的实践经验,智算场景的高性能并行文件系统可在HPC场景并行文件系统的基础上进行构建优化。

4.2.2 存储硬件

高性能存储硬件底座必须综合考虑端到端的IO数据处理流程,同时满足全SSD介质、NVMe协议和IB/RoCE高性能无损前端业务接口,才能满足训练数据

加载和CheckPoint保存对高带宽、高IOPS的要求。高性能存储硬件示意如图5所示。

a) 存储介质。主流的存储介质可分为SSD和SATA 2种。SATA硬盘部件主要由磁盘、盘片和电机组成,电机带动盘片高速旋转,通过移动磁头到盘片相应位置感知磁性来读取数据,也可以通过磁头改变盘片位置磁性来写入数据。受限于盘片磁性的物理限制,目前常见的SATA硬盘容量为几TB到20TB,容量已经很难再提升。另外,因为SATA硬盘协议和盘片旋转速度的限制,其带宽不会超过600MB/s,在随机IO的处理能力方面存在短板,无法满足智算场景的高性能要求。而采用PCIe 4.0接口和即非易失性存储器标准(Non-Volatile Memory Express, NVMe)2.0的三星

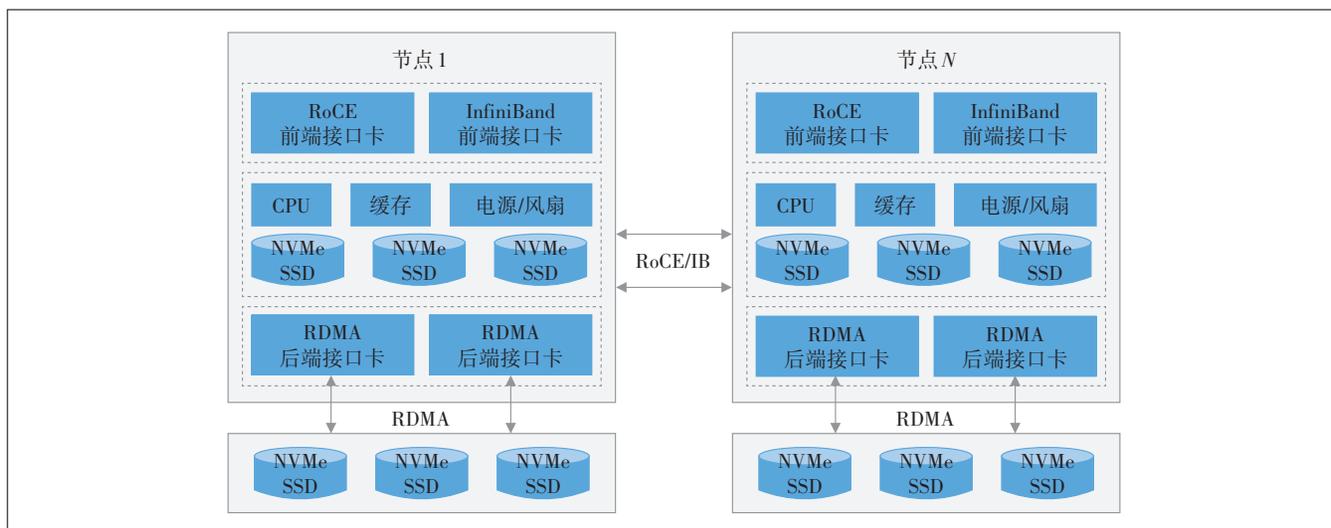


图5 高性能存储硬件示意

SSD硬盘可以提供高达约7 GB/s的带宽和155万IOPS的性能。相比传统SATA盘,其性能提升数十倍到上百倍。同时,因为没有高速旋转的物理器件,SSD盘拥有更高的可靠性和更低的功耗。

b) NVMe协议。NVMe是专为PCIe接口固态硬盘设计的行业标准,针对PCIe SSD特别设计了用于替代传统SATA、SAS的接口,能够显著提高性能、降低时延。通过NVMe协议,CPU和SSD盘可直接通信,缩短了传输路径,协议的并发数可提升到64 K,协议交互次数从4次减少为2次,读写请求处理效率提升1倍以上,时延从SATA接口的毫秒级降至微秒级,接口带宽可达7 GB/s,是SATA接口硬盘的十余倍,给SSD盘的典型性能指标带来极大提升。

c) IB/RoCE高性能无损前端业务接口。常见的无损传输协议包括FC、IB和RoCE,结合文件共享访问场景,IB和RoCE是目前的主方案,两者在性能、生态、易用性、开放性等方面各有优劣,建议结合使用场景及网络设备进行选型^[9]。

4.3 中间性能层文件存储

中间性能层文件存储主要用于数据预处理阶段的数据保存。数据预处理涉及数据清洗、转换、增强、标准化等操作,对数据存储有一定的带宽、IOPS性能要求,结合数据预处理应用和性能的要求,优先选择文件存储,以便进行数据共享访问和权限控制,保障数据安全。另外,因为数据预处理过程中数据膨胀数倍至数十倍,需要兼顾数据存储容量的要求。中间性能层文件存储方案包括文件系统软件、文件存储硬件

和网络3个部分。

a) 文件系统软件。文件系统通常有2种方案,一是以华为、NetApp为代表的专业存储厂商提供的软件和硬件一体的方案,其产品性能、功能、可靠性等方面优势明显;另一种是自研文件系统软件或基于开源Ceph分布式存储软件进行优化增强的方案,此方案可实现软硬件解耦,保障供应安全,但产品能力取决于研发团队的能力。以Ceph为例,该产品设计定位于互联网场景分布式对象存储,后逐渐扩展提供块和文件能力,但其产品定位和架构设计决定了其文件性能相对传统专业存储厂商较弱。当然,数据预处理阶段对文件存储性能的要求低于训练阶段,在满足业务性能要求的基础上,综合运营商自研能力、大容量需求和成本等因素,建议优选自研文件系统软件。

b) 文件存储硬件。在选择自研文件系统软件和软硬件解耦的基础上,文件存储硬件通常选择通用的服务器。与传统专业存储厂商提供的软硬一体存储相比,通用服务器成本更低,但硬件缺少冗余设计,导致硬件可靠性降低,系统的可靠性严重依赖软件层。随着Diskless架构的出现,专业存储厂商推出软硬解耦的存储硬件,结合高密设计如5U高度可以提供60块3.5寸SATA硬盘,在容量上1台即可替代5台传统的2U高度12盘位的服务器,综合5年生命周期的电费、机柜租赁费,采用高度专业存储硬件可以降低15%~30%的TCO,因此建议优先选择高密存储硬件。另外,数据预处理阶段的文件系统对性能仍有一定要求,建议主存选择大容量硬盘,同时配置不少于6%的

NVMe SSD 硬盘作为缓存,以提高中间性能层文件存储的性能。

c) 网络。综合考虑数据预处理阶段对文件存储性能的要求和成本,可采用成本更低的标准以太网网络架构替代 RoCE/IB 网络。在该方案中,接入层可部署 25GE 以太网,汇聚层采用 100GE 以太网,以平衡性能与总体成本。

4.4 底层大容量对象存储

底层大容量对象存储主要用于归集阶段的数据保存。归集阶段的数据保存主要涉及客户原始数据集、三方收集数据集、网络爬取数据集和训练结果的保存,对数据存储性能要求最低,其首要目标是提供便捷的网络访问方式,支撑原始数据集导入,因此优先选择对象存储。其次,原始数据集较为庞大,同样需要大容量的存储空间。底层大容量对象存储方案也包括对象系统软件、对象存储硬件和网络 3 部分,和中间性能层文件存储的相同点较多,以下主要说明其不同点。

a) 对象系统软件。对象系统通常有 2 种方案,一是以华为、Pure Storage 为代表的专业存储厂商提供的软件和硬件一体的方案,其产品性能、功能、可靠性等方面优势明显;另一种是自研对象系统软件或基于开源 Ceph 分布式存储软件进行优化增强的方案,可实现软硬件解耦,其他优缺点同基于 Ceph 的文件系统软件类似。鉴于数据归集阶段对对象存储性能的要求低于数据预处理和训练阶段,在满足业务性能要求的基础上,综合运营商自研能力、大容量需求和成本等因素,建议优选自研对象系统软件。

b) 对象存储硬件。在选择自研对象系统软件和软硬件解耦的基础上,对象存储硬件的选择与文件系统存储硬件类似,因为性能要求更低,在高密存储硬件中可以只配置大容量 SATA 硬件,少配置甚至不配置 SSD 缓存盘。

c) 网络。网络要求与中间性能层文件系统一样,选择成本更低的标准以太网网络架构即可,接入层可部署 25GE 以太网,汇聚层采用 100GE 以太网。

5 结束语

人工智能有 3 个关键因素:算力、算法和数据。算力逐渐趋同,可以通过购买快速获取;大模型算法也呈现出开源的趋势,易于获取;而数据决定着大模型训练的高度,成为最重要的核心因素,业界实践也证

明高质量的数据训练出的模型效果更好。承载数据的存储解决方案如何匹配智算训练各阶段的业务需求,提高数据存放和流动的效率,进而支撑提高智算训练效率,成为智算数据中心的难题之一^[10]。

本文结合智算数据中心训练推理各阶段对数据存储的要求与挑战,综合性能、可靠性、容量、成本等因素,提出一种分层数据存储解决方案。但高性能层、中间性能层和底层之间数据的流动仍依赖数据拷贝,导致训练前数据准备时间增长,同时数据在不同层中分别保存也导致数据存储空间的浪费。另外,如何统一管理不同层级的数据存储,便于运营运维监控,也是需要进一步解决的问题。

总之,智算场景下数据存储解决方案还面临着数据安全等更多的困难和挑战,运营商在后期的部署与运营运维阶段还会遇到各种问题,这也是后续研究的重点工作。

参考文献:

- [1] 中国信息通信研究院. 中国算力发展指数白皮书(2023年)[R/OL]. [2025-08-09]. <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202309/P020240326630458153765.pdf>.
- [2] 胡玉姣,黄韬,贾庆民,等. 通算存智一体协同的未来网络模型[J]. 通信学报,2024,45(5):12-28.
- [3] 张嗣宏,张健. 以 ChatGPT 为代表的生成式 AI 对通信行业的影响和应对思考[J]. 电信科学,2023,39(5):67-75.
- [4] 王学聪,冀思伟,李聪. 面向大模型预训练的智算网络技术研究[J]. 电信科学,2024,40(6):160-172.
- [5] 舒继武. 数据存储架构与技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2024.
- [6] 关磊,李东升,梁吉业,等. 深度学习训练中的流水线并行训练方法进展[J]. 计算机科学技术学报,2024,39(3):567-584.
- [7] 陈杰. 大数据场景下的云存储技术与应用[J]. 中兴通讯技术,2012,18(6):47-51.
- [8] 鲁蔚征,戴奇志,张策. 面向算力网络的跨域数据管理方法[J]. 大数据,2024,10(2):94-108.
- [9] 郭亮,王少鹏,权伟,等. 面向大模型的智算网络发展研究[J]. 电信科学,2024,40(6):137-145.
- [10] 王恩东. 智算中心成为新基建的基本条件与智慧时代动力源[J]. 中国工业和信息化,2020(4):44-50.

作者简介:

申佳,工程师,学士,主要从事云计算、智算方面的咨询、规划和设计工作;童俊杰,高级工程师,博士,主要从事云计算、智算规划与方案设计等工作;张奎,正高级工程师,学士,主要从事云计算、智算方面的咨询、规划和设计工作;刘千仞,高级工程师,硕士,主要从事云计算、智算规划与方案设计等工作;张世华,工程师,硕士,主要从事云计算、智算方面的咨询、规划和设计工作。