案例研究

英特尔® 傲腾™ 固态盘
英特尔® 高速缓存加速软件
英特尔® 存储性能开发套件
企业数据中心

青云用英特尔存储“黑科技”加速关键业务高性能存储系统

“当云时代来临，如何帮助企业利用其数据保持核心竞争力，是每个企业级数据中心产品和技术提供商都在思索的问题。QingStor™ NeonSAN 给出的答案是：通过不同的硬件组合，为不同应用场景下的存储需求提供高性能、高可扩展、安全可靠以及低 TCO 的解决方案。英特尔为我们提供了丰富多样的软、硬件产品和技术，给我们的解决方案提供了强劲的底层技术支撑。尤其是英特尔® 傲腾™ 固态盘与英特尔® CAS 的搭配，堪称天作之合，能帮助用户兼顾高性能和大容量两方面的需求。”

刘乐乐
存储高级技术专家
青云QingCloud

今天，数据已成为企业最具价值的核心资产之一。著名管理学大师 W. Edwards Deming（W. 爱德华· 戴明）曾言：“In God We Trust, All Others must Bring Data（除了上帝，其他皆由数据阐明）”。现代企业的经营者们已充分意识到，企业的经营与发展离不开海量的运营、产品和业务数据的支撑，因此，他们在数据中心的构建上不遗余力。从集中式存储，到直连式存储（Direct Attached Storage, DAS），再到存储区域网络（Storage Area Network, SAN），不断推陈出新的存储技术都在为企业的发展与创新提供坚实后盾。

技术在发展，互联网时代企业数据扩张的步伐也在加速。据统计，2017 年我国大数据产业规模已达 4,700 亿元人民币，同比增长 30%[1]。这一趋势让以 SAN 为存储基石的数据中心逐渐力有不逮。尤其是在高可扩展性和高每秒输入输出操作（Input/Output Operations Per Second, IOPS）方面，传统 SAN 架构仅有的 Scale-Up（纵向扩展）已无法满足需求。为此，企业大量采购专用存储服务器来升级数据中心，不仅带来巨大的成本开销，也让运维复杂度居高不下。

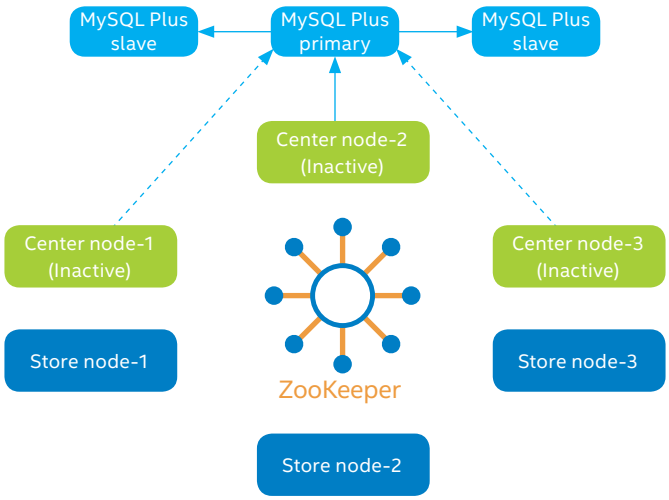
近年来逐渐兴起的软件定义存储（Software Defined Storage, SDS）是解决这一问题的优选。SDS 将传统存储服务器的核心功能剥离出来，并以软件的形式进行编排，从而具备高弹性、安全可靠以及易于部署等特点。作为在云计算行业耕耘多年的老牌劲旅，青云QingCloud* 已为逾 9 万家企业客户提供了各类公有、私有和混合云服务，同时，在企业数据中心构建方面，青云QingCloud 也颇有建树。现在，它正联手云计算领域的另一巨头英特尔，借助英特尔® 傲腾™ 固态盘、英特尔® 高速缓存加速软件 (Intel® Cache Acceleration Software , 英特尔® CAS) 等多项新产品与新技术，推出基于 SDS 理念的新一代分布式超大容量块存储系统 QingStor™ NeonSAN*（以下简称“NeonSAN”），为企业数据中心打造强劲的核心业务存储引擎。

全新的 NeonSAN 产品无论是在实验室测评，还是在用户侧实际部署中，都取得了骄人的战绩。有数据表明，它不仅能以非常高的 IOPS 性能和很低的 I/O 响应时间，来满足企业关键应用负载提出的苛刻性能需求，而且在保障业务连续性、运行稳定性以及降低

扩容周期等方面也同样令人满意。现在，NeonSAN 已在金融、制造、零售等多个行业用户处进行了部署，并成功帮助用户加速业务发展、提高决策效率，获得了用户的一致好评。

云时代企业需要怎样的数据库

随着“云时代”的到来，如何有效管控和利用企业拥有的海量数据已成为业界关注的焦点。在青云QingCloud 看来，企业数据虽然千变万化，但对于存储系统而言，核心点无外乎四个：性能、安全可靠、可扩展和成本。作为国内为数不多的全栈云服务提供商，青云QingCloud 在推出“一站式混合云”、“超融合一体化设备”等云服务架构产品之余，也在存储领域发力，与合作伙伴英特尔公司一起，协力推出了全新的分布式块存储系统“QingStor™ NeonSAN”。该产品凭借企业级的高性能、低延迟与出众的横向扩展能力，帮助青云QingCloud 在云服务版图上增添了重要的板块。

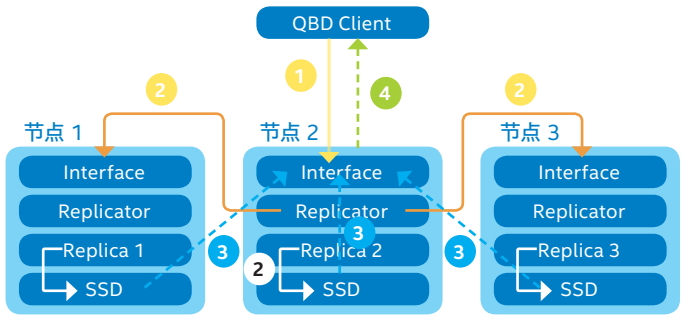


图一 QingStor™ NeonSAN 集群架构图

如图一所示，NeonSAN 存储集群由四类功能组件构成。在集群管理上，青云QingCloud 通过对分布式协调服务软件 Zookeeper* 进行大量优化，使之承担起 NeonSAN 所需的集群管理、负载均衡、主中心节点选举、分布式协调与通知等管理能力。集群中的系统控制层被称为中心节点（Center Node），其通过一主多从的模式来实现高可用性，当主中心节点（Active Center Node）失效时，Zookeeper 会自动生成新的主中心节点进行接管。在元数据存管上，NeonSAN 采用了分布式数据库集群 MySQL Plus*，其具备的强数据一致性、秒级主从切换等特性，有力地保障了主中心节点对元数据信息的访问；最后，NeonSAN 还采用了多 Store 节点的方式来实现数据层服务。

面对企业用户关注的核心需求，青云QingCloud 为 NeonSAN 提供了多项 “独门秘笈”。在存储性能上，NeonSAN 可支持远程内存直连（Remote Direct Memory Access，RDMA*），并支持 InfiniBand* 、RoCE* 、NVMeoF* 及 iWARP* 等一系列存储协议和技术，在实现超高性能、超低延时的同时，节省对处理器资源的消耗。来自青云QingCloud 的资料显示，当 NeonSAN 采用 “全闪存 + RDMA 网络”配置时，其 4K 随机读写的单盘（卷）读写性能高达 100K IOPS，而延时低至 90 微秒[2]，这一表现足以满足金融行业用户在交易类、查询类、分析类等关键业务上的高并发需求。

数据的安全可靠性是企业用户心中永远紧绷的弦。为此，NeonSAN 设置了多道安全防线来保障可用性和安全性。第一道防线，是灵活的多副本机制。不同盘（卷）可指定不同副本数，并存放在不同物理节点上。如图二所示，在此机制下，NeonSAN 节点在收到写请求后，除了写入主副本，Replicator 进程也将会从副本发送至其他节点。只有当主、从副本都成功写入后，节点才会返回成功消息，这一机制保证了数据各副本之间的强一致性。



图二 QingStor™ NeonSAN 多副本机制下的数据写入流程

第二道防线，是多路径与节点失效自动切换功能。NeonSAN 的每个节点都配备双网卡，每个网卡都具备双端口，四个端口分别连接到四个不同的交换机上。其中两台前端交换机互为冗余，构成前端网络提供对外数据服务；另两台 RoCE 交换机则互为备错，当一条链路发生故障时，节点能自动切换到其它链路而不中断业务，在网络层面保障服务的高可用。

第三道防线，是“瞬时快照”功能和“无中断的数据恢复和迁移”功能。前者允许每个单盘（卷）保留 256 个快照，在数据发生损坏时，可通过快照迅速回滚到指定时间点的数据，实现数据恢复。而后者则让节点在任意时间实施数据恢复、迁移及容量均衡时，上层业务无感知，新增节点可立即投入业务，减少集群扩容和故障对业务带来的冲击。

强大的双向扩展能力是 NeonSAN 有别于传统企业数据中心 SAN 架构的主要亮点，NeonSAN 基于 x86 架构标准硬件构建，采用了全分布式的架构设计，系统容量和性能均可进行在线水平扩展。在目前的私有云部署方案中，NeonSAN 能够支持 3 至 1,024 个节点，并可在不中断业务的情况下，实现以单节点为单位的平滑扩容。来自青云QingCloud 的测试数据表明，其单盘（卷）容量可扩展到 100TB 之巨[3]，完全可满足大数据场景下的数据存储需求。

在企业用户关心的另一个要点——成本与性价比上，NeonSAN 也给出了令人满意的方案。在私有云部署方案中，NeonSAN 能够根据用户的实际需求来提供精简配置，例如存储容量。当用户的数据增长导致所分配的容量不够时，系统能自动从后端存储池中予以补充，大大提升了存储资源的利用率。同时，NeonSAN 还支持 TCP/IP 协议，用户在使用时，既可使用全新的 RDMA 协议，也可使用传统的 TCP/IP 协议，不必二选一，不但带来更大的自由度，也最大程度地保护了用户的既有投资。

容量与性能的均衡：英特尔® 傲腾™ 固态盘 + 英特尔® CAS

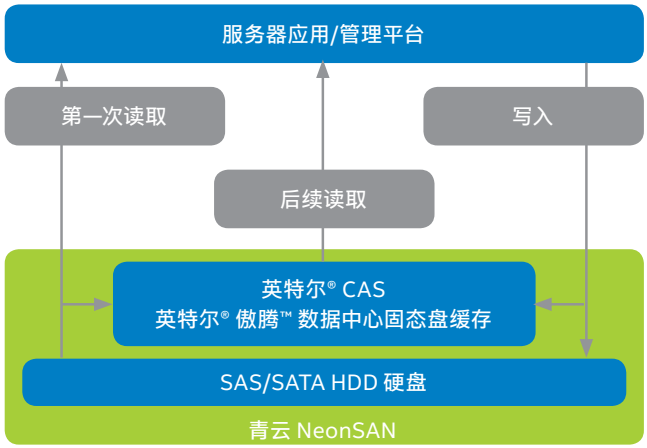
在传统企业数据中心的构建中，用户往往秉承“强强联手”的朴素理念，购置昂贵的计算设备、昂贵的存储设备和昂贵的网络设备，并将他们组合起来。然而，这类“超豪华”组合又往往达不到用户的心理预期，既造成资源的浪费，也带来诸多的兼容性问题。在青云QingCloud 看来，不同的行业用户对存储系统有着不同的需求。例如在财务、生产等联机事务处理（Online Transaction Processing，OLTP）场景下，用户追求的是高 IOPS，而在策略配置、智能应用等 OLAP 场景下，则对高吞吐，大容量有着较高要求。

针对企业数据中心不同的应用场景，青云QingCloud 利用不同的技术架构和硬件组合，为 NeonSAN 设计了不同的部署模式。首先，针对高性能、大容量存储的应用场景，青云QingCloud 提出了基于 TCP/IP 网络，SAS/SATA HDD 硬盘 + 固态盘缓存的部署方案，以分层存储（Tiered Storage）的方式，通过单节点挂载 12 块 4TB 容量的 SAS/SATA HDD 硬盘的方式，满足海量数据的存储需求。

众所周知，支持分级存储的分布式存储系统要具备高性能，就必须高效地对缓存进行读写。影响此类 NeonSAN 部署方式性能的因素，主要在于缓存的性能，以及系统管理缓存的能力。为此，青云QingCloud 引入了英特尔在这两方面的领先技术。

由全新的英特尔® 傲腾™ 固态盘DC P4800X 担纲的缓存（Cache）在 NeonSAN 上发挥出了惊人的性能表现。该数据中心级英特尔® 傲腾™ 固态盘基于创新的英特尔® 3D XPoint™ 存储介质以及英特尔先进的系统内存控制器、接口硬件和软件进行构建，其在低延迟和稳定性方面的性能表现，远远优于传统 NAND 介质固态盘，尤其适用于电商、金融、保险等多用户、高并发的 OLTP 场景，而且 NeonSAN 目前采用的英特尔® 傲腾™ 固态盘DC P4800X 375GB 版本的每天写入次数（Drive Writes Per Day，DWPD）高达 30，有力地保证了用户系统的有效生命周期[4]。

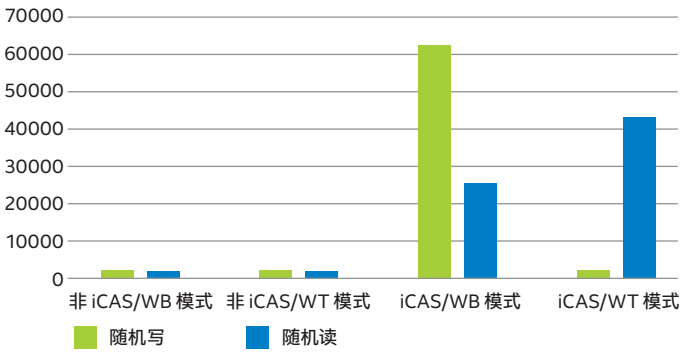
为使英特尔® 傲腾™ 固态盘在 NeonSAN 中发挥出更大效能，青云QingCloud 还引入了英特尔针对缓存性能优化开发的另一项专有技术：英特尔® CAS。如图三所示，当应用第一次读取数据时，NeonSAN 会从后端 SAS/SATA 存储中读出相应数据并返回给应用，同时数据也会被英特尔® CAS 复制到由数据中心级英特尔® 傲腾™ 固态盘构建的高速缓存中。在后续的读取中，应用直接从缓存里高速读取。而在数据写入时，所有数据都会同步写入到后端存储和高速缓存中。



图三 英特尔® CAS 技术加速原理图示

当高速缓存空间写满后，英特尔® CAS 具备的专有移出算法，会自动将新的活动数据取代高速缓存中的陈旧数据。可以看出，通过英特尔® CAS 的介入，应用服务器可始终用最快的速度读到最“热”的数据，这对于冷、热数据比例越来越悬殊的企业数据中心而言，有着非常现实的意义。

青云QingCloud 进行的一项英特尔® CAS 对比测试也有力地证明了上述观点。在 NeonSAN 上进行的在 FIO*（一款 IO 测试工具）测试中，通过执行 4K 随机读写测试，英特尔® CAS + 数据中心级英特尔® 傲腾™ 固态盘的组合，无论是在 WB（回写）模式，还是在 WT（直写）模式，IOPS 性能都远超未加组合的对比测试组。在 WB 模式下，英特尔® CAS 与英特尔® 傲腾™ 固态盘的随机写性能甚至达到了对比测试组的 23 倍之多[5]。



图四 4K 随机读写下的英特尔® CAS FIO 测试对比

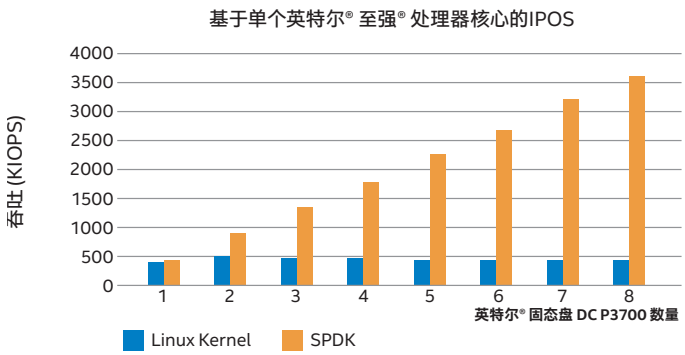
极致的存储性能表现：全闪存 + SPDK

NeonSAN 的另一种部署方案是面向超高性能、低延迟的企业应用场景。为此，青云QingCloud给出了 “全闪存配置”方案，而这个方案的主角是英特尔® 固态盘 DC P4510。这一符合非易失性内存主机控制器接口规范（Non-Volatile Memory express, NVMe）的固态盘产品，采用了英特尔® 3D NAND™ 技术，与上一代固态盘或传统 HDD 硬盘相比，其 IOPS 性能有了质的飞跃，同时能耗与故障率也有显著下降。

一项来自第三方测评机构的数据显示：配置为全闪存的 NeonSAN，在单应用压力时，4K/8K 随机读写性能均接近或超过 100K IOPS，且平均响应时间低于 0.8 毫秒。同时随着 NeonSAN 卷数量的增加，其性能也会随之线性增长，在配置 4 个 NeonSAN 卷时，4K 随机读写和 8K 随机读性能可达到 30 万 IOPS 左右，8K 随机写性能则超过 25 万 IOPS，平均响应时间低于 1 毫秒[6]。

基于 NVMe 规范的英特尔® 固态盘在为用户提供高吞吐、低延迟存储能力的同时，英特尔推出的面向固态盘存储产品的英特尔® 存储性能开发套件（Intel® Storage Performance Development Kit, 英特尔® SPDK）也在以各种创新技术提升存储软件的性能。

在 HDD 硬盘时代，中断开销仅占整个 IO 过程的很小比例，因此影响并不突出。随着固态盘产品的普及，尤其是 NVMe 固态盘的到来，其强劲的IO性能让中断开销突然变得“醒目”起来，使系统瓶颈从存储硬件转移到了软件。为此，英特尔® SPDK提供了多项创新技术，最核心的有三点：UIO/VFIO（用户态驱动），Asynchronous Polling（异步轮询机制）和无锁设计，可帮助上层应用充分利用到 NVMe 固态盘带来的高性能。在用户态驱动中，由英特尔® SPDK 实现的开发库能将存储设备的基地址寄存器（Base Address Register, BAR）地址映射到应用的进程空间中，从而尽可能降低中断开销，发挥出 NVMe 固态盘的性能优势。



图五 英特尔® SPDK 用户态驱动与内核驱动的对比测试

用户态驱动能在单处理器核心上，管理多个 NVMe 固态盘设备，实现高吞吐量、低延时以及处理器资源高效使用等优势。如图五所示，在一项针对英特尔® SPDK 用户态驱动与内核驱动的对比测试中，单处理器核心搭配 SPDK 后可令 8 块英特尔® 固态盘“火力全开”，而内核驱动要达到类似水准，则至少需要配置 8 个处理器核心[7]。

英特尔® SPDK 用户态驱动对设备完成状态的检测，是采用异步轮询机制来完成，应用在提交读写请求后，无需等待读写操作的完成，可以继续按需发送请求，然后再完成回调函数中处理，从而避免中断带来的延迟和开销，提升 IOPS。事实上，对 NVMe 固态盘设备的轮询，是非常高效的。按照 NVMe 规范，存储设备会通过读取内存来检测完成队列是否有新的操作完成，通过英特尔® 数据定向 IO（Data Direct I/O, DDIO）技术，可实现设备更新后的数据被存放于处理器缓存中，以此实现高性能的设备访问。

而英特尔® SPDK 的无锁设计，是在数据通道上去掉对锁的依赖。一方面，英特尔® SPDK 通过线程亲和性的方法，将某个处理线程绑定到特定处理器核心上，同时通过轮询的方式占住该核心的使用；另一方面，通过采用运行到完成（Run To Completion）的方式，把应用读写请求的整个生命周期都绑定到特定处理器核心上完成，从而避免再将宝贵的处理器资源用于同步线程间的数据，以进一步提高 IOPS 性能。

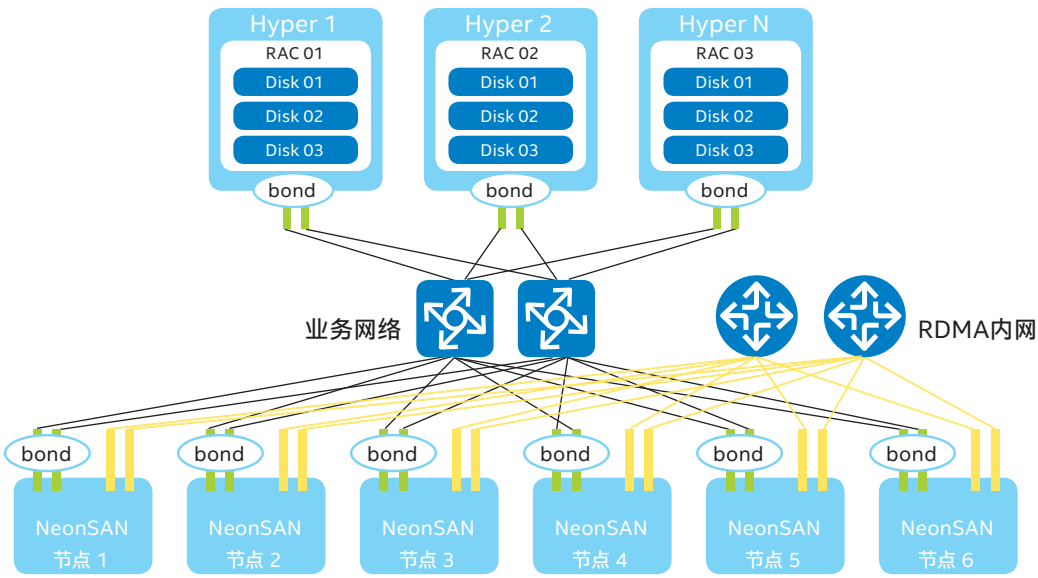
英特尔® SPDK 技术融入 NeonSAN 之后，为其带来了显著的性能提升。来自青云 QingCloud 的测试数据表明，无论是单副本还是多副本配置，随机写的时延都能降低 10 微秒左右，而多副本下随机读时延可以降低 20 微秒。混合读写场景下（读写比: 70/30），在 3 节点配置的 NeonSAN 集群中，两副本卷的读写性能都提升了近 20%[8]。

企业用户的实践

Oracle* 实时应用集群*（Real Application Clusters, RAC*）是目前企业最流行的数据库集成环境，因此，青云QingCloud 也与英特尔一起，针对 Oracle RAC 进行了大量的测试和优化，并在多个用户处进行了实际部署，获得了令人满意的反馈。

在一项通过模拟 Oracle 数据库 + NeonSAN 节点进行的评估中，整体存储系统的每分钟事务处理量（Transactions Per Minute, TPM）性能超过 165 万，平均每秒事务处理量（Transactions Per Second, TPS）性能接近 3 万，且完成每个事务处理的平均时延为 15 毫秒左右，这一性能能够支撑绝大多数的企业关键应用负载[9]。

在与某零售巨头的合作中，青云 QingCloud 不仅提供了全栈云计算解决方案来构建其集团云平台，也帮助其在生产区部署了 6 节点的 NeonSAN 集群。如图六所示，对于该企业原有业务环境中的 Oracle RAC 数据库而言，仅需添加 NeonSAN 作为共享盘，就可进行业务数据的迁移，实现了良好的扩展性。



图六 某零售巨头存储系统架构，后端部署 6 节点 NeonSAN 存储集群

该企业的反馈表明，NeonSAN 的部署有效推进了其核心 ERP 系统向云计算架构的演进，实现了私有云环境下的一体化运营与管理，在保障业务连续性的同时，大幅降低了采购和运营成本。同时，NeonSAN 表现出的可扩展性，令其存储系统的建设和扩容周期从几个月缩短至一周，可以有效满足在业务数据量激增下的扩容需求，切实推动了业务系统平滑、快速的发展。

而对另一大型金融企业客户而言，通过把各项业务与青云 QingCloud 云平台实现在线无缝对接，NeonSAN 已成为其各项核心业务，尤其是 OLTP 业务场景的存储引擎。该企业的实测数据表明，基于NeonSAN 的复杂视图查询时间缩短了 90% 左右，而复杂 SQL 语句的执行效率则从分钟级变成了秒级[10]。

来自多个实践案例的好评，说明青云QingCloud 与英特尔携手打造的 QingStor™ NeonSAN 已充分获得市场与用户的认可。未来，双方还将继续深入合作，以先进的产品与技术为企业数据中心的性能提升贡献力量。目前，青云QingCloud 正逐步将 NeonSAN 系统的处理器更换为新一代的英特尔® 至强® 可扩展处理器，并计划进一步挖掘该处理器所蕴含的性能潜力，特别是利用英特尔® 高级矢量扩展 512（英特尔® AVX-512）、英特尔® Virtual RAID on CPU（英特尔® VROC）、英特尔® 可信执行技术（Intel® Trusted Execution Technology，英特尔® TxT）的功能，来满足企业存储系统未来不断增长的算力需求，打造高效且差异化的云存储服务。

[1] 本数据来自中国信息通信研究院发布的《大数据白皮书（2018）》

[2, 3] 数字引自青云 Cloud 官网的相关产品性能说明：https://www.qingcloud.com/products/qingstor-neonsan/

[4] 数据来自据来自 https://www.intel.cn/content/www/cn/zh/solid-state-drives/optane-ssd-dc-p4800x-brief.html

[5, 8] 该测试数据援引自青云QingCloud 的内部测试报告。

[6, 9] 该测试数据来自https://www.sohu.com/a/249625689_464027

[7] 该测试数据基于以下测试环境：英特尔® 至强® 处理器 E5-2695 v4 单处理器核心，4K 随机读测试，128 的队列深度，操作系统为 CentOS* Linux* 7.2，Linux 内核 4.10.0，测试固态盘为 8 块英特尔® 固态盘 P3700 NVMe (800GB)。

[10] 该测试数据来自《DT 时代性能测试报告：什么样的存储引擎让 Oracle 数据库性能 100% 增长？》，https://www.sohu.com/a/249625689_464027