

QLC NAND 技术已准备好在 数据中心全面推广

通过整合创新技术，英特尔® QLC 3D NAND 固态硬盘有助于降低成本，同时可提供读取密集型工作负载所需的可靠性和低延迟性能。

组织对于温数据的访问需求快速增长

数据正呈现出指数级增长，IDC 数据显示，全球数据量到 2025 年预计将增长至 175 ZB¹。这一增长速度超乎想象，但我们不只面临数据量不断增长的挑战，还要确保更多数据的可用性，保持数据的“暖”属性，将数据用于当前的关键业务应用，如分析、人工智能（AI）、机器学习（ML）和内容交付网络（CDN）。例如，随着越来越多不同类型的数据馈送到这些应用中，AI 和分析结果的准确性通常会随之提高。组织部署的大容量存储需要为相关工作负载提供海量、且不断增长的温数据。

英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘带来卓越耐用性

英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘依赖对于可靠技术的多代改进，以提供适当的耐用性。例如，作为首代面向数据中心的英特尔 QLC NAND 产品，英特尔固态硬盘 D5-P4320 相比其它的 QLC NAND 固态硬盘，可提供高出多达 4 倍的耐用性⁵。全新英特尔固态硬盘 D5-P5316 进一步增强了耐用性，相比上一代英特尔 QLC NAND 固态硬盘，将随机写入耐用性最高提升了 5 倍⁶。

许多组织在其数据中心内部署了成本较低的机械硬盘（HDD），以满足不断增长的存储容量需求。但机械硬盘无法满足现代工作负载对更快读取访问速度的需求。机械硬盘还会占据数据中心的较大面积，因而会增加空间、电源、散热和替换方面的成本。

一些组织采取的策略是将较慢、较笨重的机械硬盘，更换为更快、更密集的三层单元（TLC）NAND 固态硬盘（SSD）。TLC NAND 固态硬盘适用于混合和写入繁重的工作负载，如高速缓存应用，但通常未经过成本和容量优化，难以满足以读取为中心的大规模数据需求。

更切实可行的选择是用英特尔® QLC 3D NAND 固态硬盘替换机械硬盘，其兼具成本效益出色的大容量和远超机械硬盘的读取性能。事实上，与机械硬盘相比，30.72TB 英特尔® 固态硬盘 D5-P5316 可将温数据存储的空间占用降低多达 20 倍。² 相比机械硬盘的持续传输速率，英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘还可提供最高达 25 倍的顺序读取性能³。而且英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘还可提供密度优化与媲美 TLC 的读取性能，因而可帮助组织大幅降低读取密集型存储工作负载的资本支出（CapEx）。

QLC NAND 架构

四层单元（QLC）NAND 技术将密度增加到每单元 4 比特，相比 TLC NAND 可提供多 33% 的每单元比特，因而能够将数据容量扩展到大于单层单元（SLC）、多层单元（MLC）和 TLC NAND 技术的水平。随着密度增加，每 GB 成本会下降（见图 1）。

NAND 固态硬盘的密度不断增加

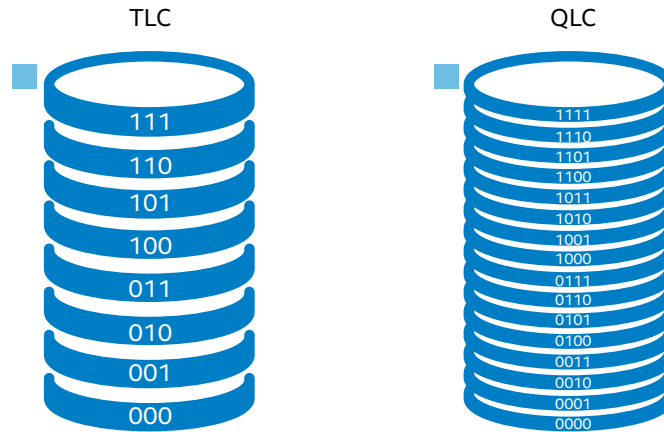


图 1. PCIe 英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘为每单元 4 比特，相比 TLC 固态硬盘可提供多 33% 的每单元比特，同时提供相当的顺序读取性能。⁴

固态硬盘和机械硬盘耐用性比较

机械硬盘耐用性主要受限于物理设计因素，例如硬盘里的大量移动部件。部件逐渐磨损导致的故障会降低机械硬盘的性能或使其无法使用。例如，振动或冲击会导致磁头未对准。由于耐用性主要是一种物理限制，因此机械硬盘同样会受到读取和写入的影响。

反之，固态硬盘没有移动部件，因此不存在机械磨损。对于固态硬盘，耐用性会受到单元退化的影响，退化主要由写入而非读取造成，可通过控制器固件中的各种缓解技术来减少退化。

NAND 固态硬盘的写入磨损程度部分取决于盘上已有数据的状态，因为数据是按页写入、按块擦除的。顺序数据可高效写入较新固态硬盘的连续可用页面。然而，当需要更新较小的数据块时（如修改文档或数值），旧数据将读入内存、被修改、然后重新写入盘上的新页面。包含已弃用数据的旧页面标记为无效。

当没有可用页面时，需要释放那些“无效”页面，以用于“碎片整理”或“磨损均衡”的后台进程。特定块中的全部现有有效页面必须先复制到盘上的其他可用位置，确保原始块仅包含无效的弃用页面。然后可以删除原始块以腾出供新数据写入的空间。内部 NAND 管理进程（如磨损均衡）会导致写入放大，即固态硬盘上的所有内部写入大于仅将新数据存入盘上所需的写入。由于每次写入会造成单个 NAND 单元的细微退化，所以写入放大是磨损的主要因素。

内置处理有助于 NAND 固态硬盘将磨损均匀分散到整个盘中。需要指出的是，写入繁重的工作负载（尤其是随机写入）会导致 NAND 固态硬盘相比其他 IO 模式磨损更快，因为它们会导致更大的写入放大。

QLC NAND 固态硬盘为现代工作负载提供卓越耐用性

对于大多数现代工作负载部署，QLC NAND 固态硬盘可提供丰富的耐用性，因为：

- 英特尔 QLC NAND 的实际耐用性超出了传统认知和理论限制。
- QLC NAND 固态硬盘具有更大的容量，能够将磨损分散到更大的区域。
- 大多数固态硬盘在使用的全程，只会消耗一小部分额定的固态硬盘寿命。

实际耐用性与预期耐用性

英特尔固态硬盘 D5-P5316 证明，QLC NAND 固态硬盘可以提供行业领先的耐用性水平。此外，QLC NAND 固态硬盘的真实耐用性在多个方面超出了预期。通过固态硬盘驱动控制器将写入均匀分布到盘上，可以避免一些单元受到反复冲击。大容量 QLC NAND 固态硬盘提供了更大的“表面积”来分配写入，从而减少整体退化。

此外，对耐用性需求的认识与实际使用模式之间存在显著差距，2020 年 2 月 USENIX 大会上公布的一项大规模研究对此进行了重点说明⁸。该研究报告指出，实际应用下的耐用性要求通常远低于企业的预期。作者表示：“基于我们的数据，我们预测并认为，对于绝大多数企业用户来说，转向 QLC 在固态硬盘寿命上没有风险，因为 99% 的系统最多使用了其硬盘 15% 的额定寿命。”

大容量 QLC NAND 的寿命耐用性等于更小容量的 TLC NAND

固态硬盘耐用性通常按照每日固态硬盘写入次数（DWPD）衡量，DWPD 可测量在保修寿命内磁盘每日可写入的数据量。写入 TB 数（TBW）或写入 PB 数（PBW）也可用于表示耐用性，该指标可衡量在规定寿命内可写入磁盘的总数据量。磁盘的总耐用性取决于其容量。例如，图 2 所示为一个 8TB TLC 固态硬盘（1



$$8\text{TB} * 1 \text{ DWPDP} = 14,600 \text{ TBW}$$

$$32\text{TB} * 0.25 \text{ DWPDP} = 14,600 \text{ TBW}$$

图 2. DWPDP 和容量确定写入总字节的示例。

DWPDP, 5 年保修寿命), 理论上可在 5 年内每天处理 8TB 的数据写入。但请注意, 额定 DWPDP 为 0.25 的 5 年保修期 32TB QLC NAND 固态硬盘不一定可达到理论性能, 实际的总体耐用性可能有所偏差。这是因为可写入该固态硬盘的数据总量与较小的 TLC 磁盘相同 (32TB 容量乘以 0.25 DWPDP) 。

此外, 存储管理人员可以通过留出额外的硬盘空间 (在上述理论示例中为 20%) 来进一步提高有效耐用性。通过增加硬盘上的保留区域, 将能够为有效的碎片整理和磨损均衡留出更大的空间, 进而减少写入放大。

对于 NAND 固态硬盘耐用性, 工作负载很重要

如上所述, NAND 固态硬盘的实际耐用性远高于机械硬盘, 尽管存在常见的误解, 但它可以明显大于规定的 DWPDP。但是, 面向不同应用场景的固态硬盘耐用性也取决于客户的使用模式和工作负载的性质。

如图 3 所示, 机械硬盘往往具有一致但较低的耐用性, 而 NAND 固态硬盘展现了不同的耐用性, 具体取决于数据的模式和块大小。

例如, 如果应用依赖于小数据块的频繁随机写入, 它将比大块数据的顺序读取更多地消耗 NAND 固态硬盘的寿命。这就是为什么 QLC NAND 固态硬盘适用于读取繁重的工作负载, 这类工作负载也需要大容量以快速访问更多数据。

虽然针对读取性能进行了优化, QLC NAND 也适用于其他数据使用模式。凭借支持大数据块的充足写入性能, QLC NAND 能够支持某些细分市场的混合工作负载。

有关特定的工作负载放置示例, 请参见本文的“[使用英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘支持现代工作负载](#)”部分。

QLC NAND 的质量和可靠性

由于 QLC NAND 技术很复杂, 因此业内许多人认为必须在数据可靠性、数据保持和硬盘整体可靠性等方面进行妥协。凭借三十年的浮栅架构经验, 英特尔打造了一款毫无妥协的解决方案。英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘满足联合电子设备工程委员会 (JEDEC) 的所有要求, 相当于广泛采用的 TLC NAND 固态硬盘。

机械硬盘和 QLC NAND NAND 固态硬盘的耐用性, 以写入总字节表示 (更高越好)

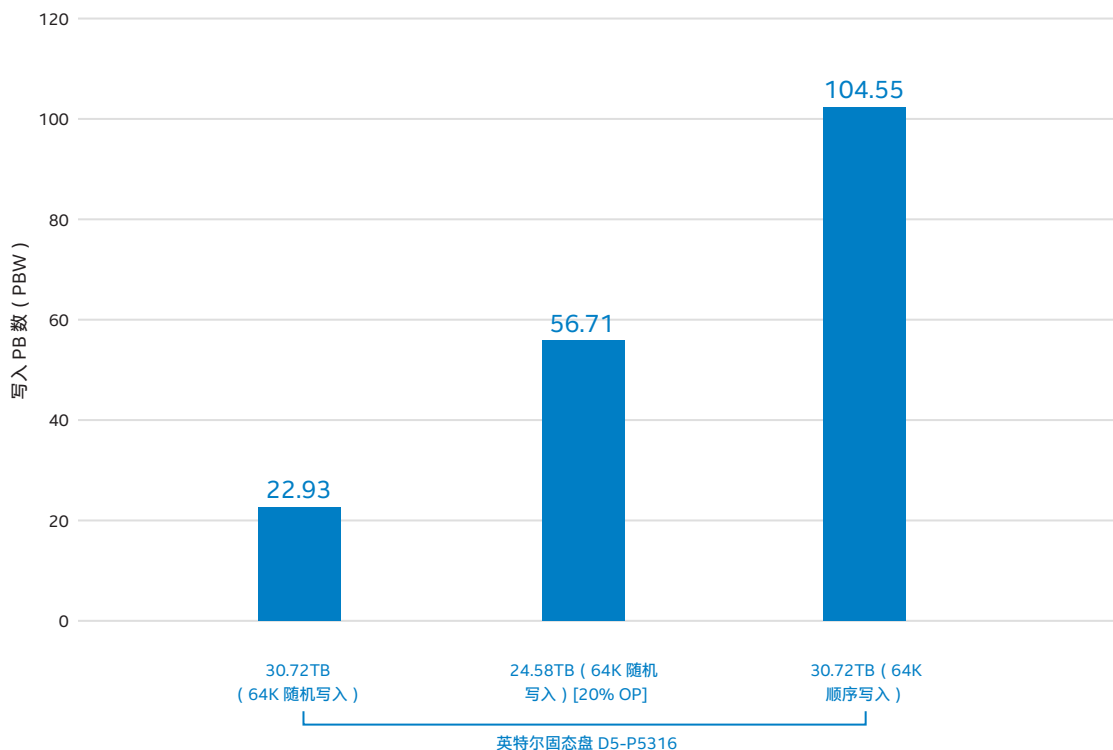


图 3. QLC NAND 的实际耐用性, 机械硬盘与英特尔固态硬盘 D5-P5316 相比, 以写入 PB 数 (PBW) 表示。⁹

表 1 显示了英特尔 QLC NAND 固态硬盘与 TLC NAND 固态硬盘的比较情况。两者具有相同的故障率、不可纠正的位错误率（UBER）、操作振动和温度范围，以及同样的 5 年保修。

表 1. 英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘和英特尔 TLC NAND 固态硬盘在质量、可靠性等方面的规格比较。

规格	TLC NAND 固态硬盘： 英特尔固态硬盘 D7-P5510 ¹⁰	QLC NAND 固态硬盘： 英特尔固态硬盘 D5-P5316 ⁷
质量		
平均故障间隔时间（MTBF）	2M 小时	2M 小时
年故障率（AFR）	<0.44%	<0.44%
可靠性		
保修	5 年	5 年
UBER	每 10 ¹⁷ 位读取一个	每 10 ¹⁷ 位读取一个
数据保持（40°C 的温度）	3 个月	3 个月
环境		
操作振动	2.17 Grms	2.17 Grms
温度范围	0°C 到 70°C	0°C 到 70°C

将英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘与许多企业机械硬盘的质量和可靠性额定值进行比较时，差异更加明显。表 2 将英特尔固态硬盘 D5-P5316 与两个常用的企业机械硬盘进行了比较。其中显示英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘的 UBER 比机械硬盘高两个数量级。QLC NAND 固态硬盘在各种操作条件下表现出众，在振动、温度和磁性方面具有较高规格。

表 2. 英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘和常用企业机械硬盘的质量和可靠性规格比较。

	英特尔固态硬盘 D5-P5316 ⁷	Western Digital Ultrastar DC HC650 ¹¹	Seagate Exos X18 ¹²
硬盘类型	QLC NAND 固态硬盘	机械硬盘	机械硬盘
保修	5 年	5 年	5 年
UBER	每 10 ¹⁷ 位读取一个	每 10 ¹⁵ 位读取一个	每 10 ¹⁵ 位读取一个
每日盘读/写次数（DxPD）	0.41	0.08（20TB 容量）	0.094
写入/擦除（P/E）循环次数	3,000	不适用	不适用
操作振动	2.17 Grms	0.67 Grms	0.70 Grms
受磁性影响	无	有	有

除了表 2 中突出显示的优势外，NAND 固态硬盘相比机械硬盘还表现出较低的实际故障率。上文提到的 USENIX 研究发现，NAND 固态硬盘的平均年度返盘率（ARR）介于 0.07% 和近 1.2% 之间，机械硬盘为 2-9%。通过比较这两个数据，我们可以发现 NAND 固态硬盘的 ARR 相比机械硬盘低 7.5 到 28 倍⁸。

在数据中心内使用英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘支持现代工作负载

借助经过读取优化的大容量英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘，您可以从更多的温数据中获得更多价值，同时降低可靠技术的总体拥有成本（TCO）。

加速访问更多数据

QLC NAND 具有出色的顺序和随机读取性能，可帮助您高效处理海量温数据。这些特征使这种固态硬盘适用于现代企业应用，例如 AI 或数据分析。

这些用例依赖于快速读取性能和可预测的低延迟，以支持更快地访问数据，并通过扩展满足未来需求。

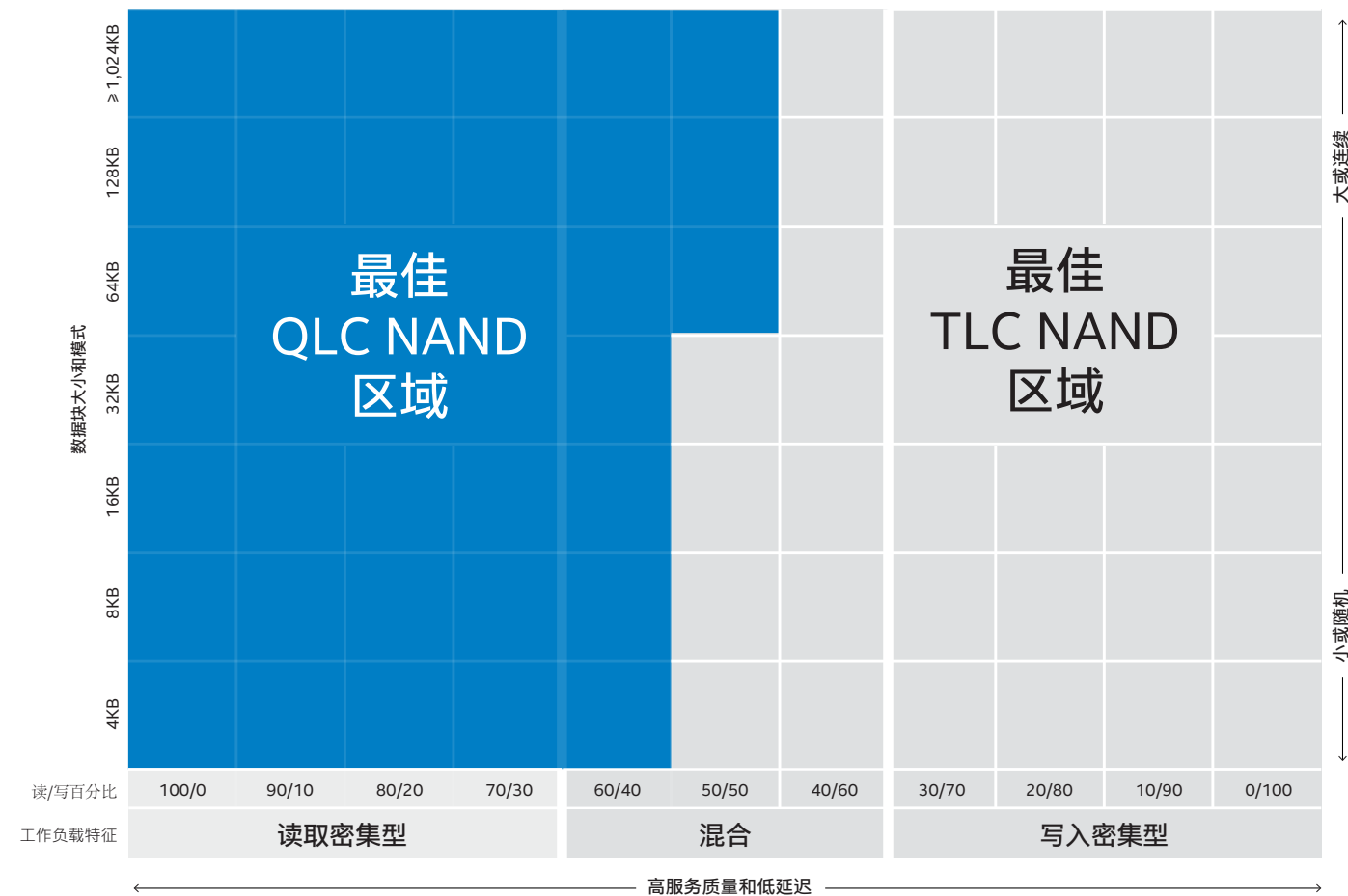


图 4. 将工作负载与 QLC NAND 固态硬盘匹配时可使用的特征。

要确定 QLC NAND 固态硬盘是否与您的工作负载匹配，请查找以下特征：

- 带宽：传输海量数据以支持计算的高读取带宽
- 服务质量（QoS）：低延迟和高服务质量，有助于优化计算利用率并缩短获取结果的时间
- 使用模式：读取密集型（顺序或随机）工作负载，即使面临大数据块写入压力也能够游刃有余
- 数据块大小：范围广（读取）

图 4 显示了哪些工作负载部分与 QLC NAND 固态硬盘相匹配（基于使用模式）。

英特尔 QLC NAND 的性能

英特尔固态硬盘 D5-P5316 包括现代固件，能够为高容量存储提供卓越的读取性能和高度的可扩展性。这款固态硬盘也是行业首个采用 PCIe 4.0 控制器的 QLC NAND 固态硬盘。相比英特尔

QLC 3D NAND 固态硬盘提供的 PCIe 接口和高效 NVMe express（NVMe）协议支持的多通道 I/O 功能，基于串行 ATA（SATA）的 QLC NAND 固态硬盘将在吞吐量上受到更大的限制。因此，英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘更适合现代工作负载的大规模吞吐量要求。

旨在提升读取性能的架构和功能改进也有利于最新一代的英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘。与上一代相比，英特尔固态硬盘 D5-P5316 实现高达 38% 的随机读取性能提升及高达 2 倍的顺序读取性能提升。^{13,14} 该固态硬盘还包括智能固件，相比上一代产品可在 99.999% 服务质量的情况下将延迟性能提升 48%。¹⁵

与机械硬盘相比，QLC NAND 的性能优势更加明显。尽管具有明显的成本/容量优势，但机械硬盘束缚了所存储数据的价值，因为它们运行较慢，无法支持需要快速访问温数据的工作负载。如表 3 所示，与常用的企业机械硬盘相比，最新一代的英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘可将顺序读取性能提升高达 25 倍。³

表 3. 英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘与两款常用机械硬盘的读取性能比较。

	英特尔固态硬盘 D5-P5316 ⁷	Western Digital Ultrastar DC HC650 ¹¹	Seagate Exos X18 ¹²
硬盘类型	QLC NAND 固态硬盘	机械硬盘	机械硬盘
顺序读数 (固态硬盘) /持续传输速率 (机械硬盘) (高达)	7,000 MB/秒	250 MB/秒 (持续传输速率)	270 MB/秒 (持续传输速率)
随机读取 (高达)	800K 每秒输入/输出操作 (IOPS) (4K 随机读取)	未指定	170 (队列深度 16)
平均延迟	120 微秒/180 微秒 (随机读/写)	4.16 毫秒	4.16 毫秒

降低您的存储 TCO

TCO 的概念包括采购成本和运行系统的持续费用，这有助于组织做出决策。考虑到业务目标和配置差异较大，因此没有一刀切式的 TCO 计算方式。但是，领先的超大规模存储厂商和创新者需对相关因素进行协调和建模，根据资本支出和运营支出拟定可行的 TCO 测量方法。一些因素并未得到广泛使用，甚至不为人所知。鉴于 QLC 固态硬盘相比于机械硬盘和 TLC 固态硬盘的固有优势，企业有必要了解这些优势，这有助于在数据经济时代推进存储的现代化。

资本支出始于有效的容量。有效容量以有效 TB (TBe) 表示，是经过复制、容量利用和数据精简后的实际可用存储空间。有效容量对 TCO 具有较大的影响，由于需要提供冗余，并满足性能要求，用户购买的总原始存储在成本上具有乘数效应。存储解决方案提供商在描述每 TB 存储成本时通常将有效容量作为宣传点。

运营支出涵盖电源、散热和磁盘故障方面的成本。行业领导者将资本支出与运营支出的 Tbe 方法相结合，设计了每机架每 TBe 总体拥有成本的总体底线指标。

QLC NAND 固态硬盘相比机械硬盘的成本节省

众所周知，固态硬盘具有远胜于机械硬盘的性能，并具有可靠性优势。鉴于这些内在优势，固态硬盘不需要通过复制增强性能，通常也更少需要通过复制增强可靠性。

相比于机械硬盘，具有性能优势的固态硬盘也有助于大幅提高数据精简方法的效率。数据精简表示所存储主机数据与所需物理存储的比率，50% 的比率相当于 2:1 的数据精简比率。因为数据精简可帮助用户存储超过物理硬件能力的更多数据，所以产生的有效容量会增加。压缩和重复数据删除技术可以大幅降低满足“可用容量”要求所需的原始存储容量。

现代算法针对固态硬盘进行了优化，可充分利用它们的性能实现高数据精简比率 (DRR)，同时提供高应用性能。举例来说，[Facebook 的 Zstandard 压缩算法](#)可实现超快的压缩和解压缩速度，远超机械硬盘的读/写能力，因而支持在固态硬盘上实时使用算法。此外，在 VMware VSAN 中，压缩和重复数据删除功能仅在全闪存配置中提供。

QLC NAND 固态硬盘相比 TLC NAND 固态硬盘的成本节省

相比于部署 TLC 固态硬盘，QLC NAND 固态硬盘可节省大量成本，不过机械硬盘的替换需求更为庞大。成本节省主要集中在资本支出方面，因为相比于 TLC NAND，QLC NAND 具有内在的存储密度优势和相应的每 TB 成本节省机会。QLC NAND 具有与 TLC 相当的读取性能，有助于降低读取密集型工作负载的总体拥有成本。

存储的变化性质

企业正在反思他们的数据管理方法。一直以来，机械硬盘提供了一种成本效益出色的方法来存储大量的冷数据。如今，随着用户开始向 AI、数据分析和大数据等现代应用过渡，他们日益需要快速访问不断增长的海量数据。

与此同时，随着固态硬盘创新提速，机械硬盘创新正在减速。根据 Wikibon 分析师提供的数据，机械硬盘生产和使用正在下降，“.....数据将继续快速下滑，十年后预计将减少至当前的 1/10。”¹⁶

随着企业努力以更快速度提供更多产品和服务，快速可靠访问海量数据的需求将不断增长。用户无法依赖传统技术来支持现代应用。英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘进行了持续改进和创新，能够弥合慢速低效机械硬盘和昂贵 TLC 固态硬盘之间的容量、性能和 TCO 差距。

实际上，从超大规模 CSP 到存储解决方案提供商、创新型初创企业等众多行业领导者，无一不在转向至 QLC NAND 技术。

依托可靠技术推进现代化

在存储行业，英特尔积累了丰富的经验和深厚的专业知识，拥有牢靠的领导地位。英特尔依托可靠技术推动创新和改进，满足用户对快速访问更多数据的日益增长的需求。

浮栅 NAND 技术提供了强大的电压阈值窗口和单元隔离，能够可靠扩展至更多的每单元比特数。在第三代 QLC NAND 技术中，英特尔将垂直浮栅设计扩展到 144 层 QLC 3D NAND，可提供行业领先的密度，质量和可靠性，这使其能够媲美 TLC 固态硬盘、并远超运行缓慢的传统机械硬盘¹⁷。

每一代的性能都更进一步。与上一代英特尔固态硬盘 D5-P4326 相比，英特尔固态硬盘 D5-P5316 可：

- 将随机读取性能提升高达 38%¹³
- 将顺序读取性能提升高达 2 倍¹⁴
- 在 99.999% 的服务质量下将延迟降低多达 48%¹⁵

使用英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘提取数据的更高价值

如果您的企业需要快速可靠地读取温数据，英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘可满足您的需求，弥合慢速、低效机械硬盘和昂贵 TLC NAND 固态硬盘之间的差距。英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘基于可靠技术而构建，将高密度存储与卓越的低延迟读取性能相结合，能够支持现代的关键业务工作负载，包括 ML、AI、CDN、分析和大数据。此外，英特尔 QLC 3D NAND 固态硬盘能够整合数据中心中的存储占用空间，帮助您降低 TCO。

了解更多信息

[关于英特尔 3D NAND 固态硬盘](#)

[英特尔® 固态硬盘 D5-P5316 产品简介](#)

[QLC NAND 固态硬盘最适合现代工作负载](#)

[用高效、成本效益出色的英特尔® QLC 3D NAND 固态硬盘替换内容交付网络中的传统存储](#)



¹ 来自 IDC 报告的数据：“数据时代 2025：数据演变成攸关生命的要素。”

² “暖存储占用空间减小多达 20 倍”的声明基于 4TB 机械硬盘和 30.72TB 英特尔固态硬盘 D5-5316 E1.L 或 U.2 驱动器的比较，前者需要 10（2U）的机架空间来填充 1PB 存储，后者需要 1U 的机架空间来填充 1PB 的存储。机架整合效率提升高达 20 倍。

³ 基于英特尔固态硬盘 D5-P5316 的顺序读取性能（[intel.com/content/www/us/en/products/memory-storage/solid-state-drives/data-center-ssds/d5-series/d5-p5316-series.html](https://www.intel.com/content/www/us/en/products/memory-storage/solid-state-drives/data-center-ssds/d5-series/d5-p5316-series.html)），比较了 Seagate Exos X18（[seagate.com/files/www-content/datasheets/pdfs/exos-x18-channel-DS2045-1-2007GB-en_SG.pdf](https://www.seagate.com/files/www-content/datasheets/pdfs/exos-x18-channel-DS2045-1-2007GB-en_SG.pdf)）。

⁴ 英特尔 QLC NAND 和英特尔 TLC NAND 具有相当的读取性能，此结果基于英特尔对英特尔固态硬盘 D5-P5316 运行顺序读取工作负载时的性能测量值（7,000 MB/秒）。

⁵ “耐用性相比竞争对手高 4 倍”的声明基于 7.68TB 英特尔固态硬盘 D5-P4320（2,803 TBW）与 7.68TB Micron 5210 ION 固态硬盘（700 TBW）的比较（[micron.com/solutions/technical-briefs/micron-5210-ion-ssd](https://www.micron.com/solutions/technical-briefs/micron-5210-ion-ssd)）。

⁶ “耐用性实现 5 倍迭代提升”的声明基于 30.72TB 英特尔固态硬盘 D5-P5316（22,930 TBW）和 15.36TB 英特尔固态硬盘 D5-P4326（4,400 TBW）的耐用性比较（间接-单元-对齐，随机写入工作负载）。对于等效比较，英特尔固态硬盘 D5-P5316 使用了 64KB 随机写入工作负载，英特尔固态硬盘 D5-P4326 使用了 16KB 随机写入工作负载进行耐用性测量。

⁷ 英特尔。“英特尔® 固态硬盘 D5-5316 提供了行业领先的耐用性，DWPD 为 0.41。”[intel.com/content/www/us/en/products/memory-storage/solid-state-drives/data-center-ssds/d5-series/d5-p5316-series.html](https://www.intel.com/content/www/us/en/products/memory-storage/solid-state-drives/data-center-ssds/d5-series/d5-p5316-series.html)

⁸ Stathis Maneas 和 Kaveh Mahdavian, 多伦多大学; Tim Emami, NetApp; Bianca Schroeder, 多伦多大学。“大规模企业存储部署中的固态硬盘可靠性研究。”2020 年 2 月。[usenix.org/system/files/fast20-maneas.pdf](https://www.usenix.org/system/files/fast20-maneas.pdf)

⁹ 英特尔固态硬盘 D5-P5316 耐用性基于 64KB 随机写入和 64KB 顺序写入工作负载。20% OP 表示过度配置的磁盘耐用性。通过创建一个大小占可用区域 80% 的命名空间来完成过度配置。Seagate Exos X18 耐用性数据来自其数据表：[seagate.com/files/www-content/datasheets/pdfs/exos-x18-channel-DS2045-1-2007GB-en_SG.pdf](https://www.seagate.com/files/www-content/datasheets/pdfs/exos-x18-channel-DS2045-1-2007GB-en_SG.pdf)。Western Digital Ultrastar DC HC650 耐用性数据来自其数据表：https://documents.westerndigital.com/content/dam/doc-library/en_us/assets/public/western-digital/product/data-center-drives/ultrastar-dc-hc600-series/data-sheet-ultrastar-dc-hc650.pdf。机械硬盘 DWPD 计算：（550TB/年）/365 天/容量（TB）。机械硬盘 PBW 计算：（（550Tb/年）*5 年）/1000。

¹⁰ 英特尔。“从云中获得灵感，实施性能优化。”2020 年 12 月。[intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/product-briefs/d7-p5510-product-brief-v2.pdf](https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/product-briefs/d7-p5510-product-brief-v2.pdf)

¹¹ Western Digital 数据表：Ultrastar DC HC650。https://documents.westerndigital.com/content/dam/doc-library/en_us/assets/public/western-digital/product/data-center-drives/ultrastar-dc-hc600-series/data-sheet-ultrastar-dc-hc650.pdf

¹² Seagate 数据表：Exos X18。[seagate.com/files/www-content/datasheets/pdfs/exos-x18-channel-DS2045-1-2007GB-en_SG.pdf](https://www.seagate.com/files/www-content/datasheets/pdfs/exos-x18-channel-DS2045-1-2007GB-en_SG.pdf)

¹³ “随机读取性能相比上一代产品提升多达 38%”的声明基于英特尔产品规格，比较了 15.36TB 英特尔固态硬盘 D5-P5316 和 15.36TB 英特尔固态硬盘 D5-P4326 的 4KB 随机读取、队列深度 256（QD 256）性能测量。性能测量数据分别为英特尔固态硬盘 D5-P5316 和英特尔固态硬盘 D5-P4326 的 800K 和 580K IOPS。

¹⁴ “顺序读取性能相比上一代产品提升多达 2.1 倍”的声明基于英特尔产品规格，比较了 15.36TB 英特尔固态硬盘 D5-P5316 和 15.36TB 英特尔固态硬盘 D5-P4326 的 128KB 顺序读取、QD 256 性能测量。性能测量数据分别为英特尔固态硬盘 D5-P5316 和英特尔固态硬盘 D5-P4326 的 7.0 和 3.2 GB/秒。

¹⁵ “在 99.999% 的情况下将延迟性能提升 48%”的声明基于英特尔产品规格，比较了 15.36TB 英特尔固态硬盘 D5-P5316 和 15.36TB 英特尔固态硬盘 D5-P4326 的 4KB 随机读取、99.999% 下的队列深度 1（QD 1）延迟性能测量。性能测量数据分别为英特尔固态硬盘 D5-P5316 和英特尔固态硬盘 D5-P4326 的 600 和 1,150 微秒。百分比变化为 48%。

¹⁶ Wikibon。“QLC Flash HAMR 机械硬盘。”2021 年 1 月。<https://www.wikibon.com/qlc-flash-hamrs-hdd/>

¹⁷ 行业领先的容量扩展。借助 30.72TB 英特尔固态硬盘 D5-P5316 实现行业最高的容量。

性能因使用、配置和其他因素而异。如欲了解更多信息，请访问：[www.Intel.com/PerformanceIndex](https://www.intel.com/PerformanceIndex)

性能结果基于配置信息中显示的日期进行测试，且可能并未反映所有公开可用的安全更新。请查看备用页，了解配置详情。没有任何产品或组件是绝对安全的。

您的成本或结果可能有所差异。

英特尔技术可能需要启用硬件、软件或激活服务。

© 英特尔公司版权所有。英特尔、英特尔标识以及其他英特尔商标是英特尔公司或其子公司在美国和/或其他国家的商标。其他的名称和品牌可能是其他所有者的资产。