

长期服役嵌入式平台的生命周期保障

长期生命周期应用为何需要稳定的嵌入式存储

长期服役的嵌入式平台通常需要在现场稳定运行十年以上。一旦部署，系统通常不会再进行频繁维护或更换，因此组件在整个服役周期内都必须保持稳定一致的运行表现。



初始认证仅反映设备在认证当时版本下的状态。后续供应链中的器件版本变更可能导致时序裕量发生变化、ECC 裕量发生改变，或影响磨损均衡等后台管理机制。这些变化通常不会在标准验证阶段暴露出来，却可能在实际运行环境中逐渐表现为间歇性错误、延迟增加，甚至触发意外恢复事件。

嵌入式存储对系统环境十分敏感，因为其运行表现取决于主控、NAND Flash、固件以及供电条件之间的协同作用，而非各自独立发挥作用。

上述任一层发生变化，都可能导致延迟特性发生改变、ECC 裕量降低，或影响垃圾回收（Garbage Collection）和磨损均衡（Wear Leveling）等后台管理机制。这些影响在验证阶段往往难以发现。它们通常会在高负载条件下暴露出来，例如持续写入、低电压事件或温度极限等场景。此时后台运行与主机访问竞争，导致错误率开始上升。

商用闪存市场变化速度极快。NAND 制程持续演进，主控不断更新，固件版本也持续迭代。这些更新虽然降低了成本、提升了存储密度，却也改变了器件的运行特性。这使其与长生命周期产品的设计要求产生了偏差，因为这类产品要求，通过认证的器件在整个服役周期内都应保持一致的运行表现。

存储器件通常必须在产品开发初期完成选型。器件是在预先定义的测试条件下完成认证的，但这些条件无法完全覆盖真实现场环境。部署完成后，系统还将长期面对温度循环、电源波动、振动以及不均衡写入等实际工况。在这些工况下，读干扰（Read Disturb）、数据保持能力下降（Retention Loss）以及写放大（Write Amplification）等失效机制将成为主要影响因素。延迟波动进一步增大，ECC 裕量消耗速度加快，后台管理操作开始与主机访问争用系统资源。

此时，标称性能指标已不再是关键。真正重要的是，存储器在持续高负载工况下的运行表现，以及这种表现能否长期保持稳定。

长寿命设计的集成式存储

采用独立的 NAND 与主控芯片的方案，会引入许多难以在产品生命周期内持续控制的变量。NAND 修订、主控芯片更改和固件更新的行为，并非始终与原始合格配置的方式相同。

将主控与 NAND 集成到同一受控存储器件中，可有效降低对外部器件组合的依赖。闪存管理、ECC 与固件作为整体协同开发和验证，而非依赖外部器件的组合搭配。这能够降低产品生命周期后期因器件替换而导致运行特性发生变化的风险。

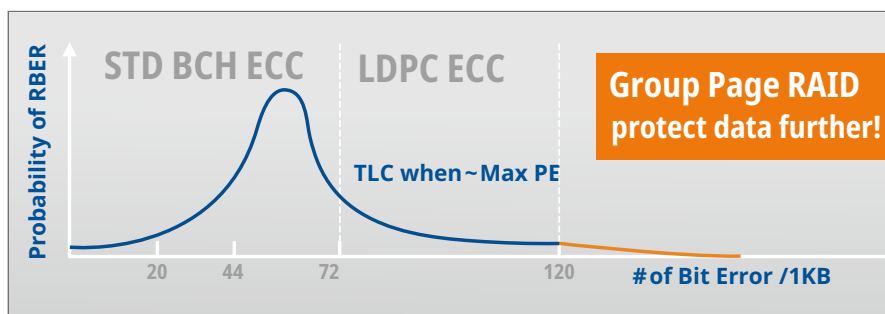
对于长期服役系统而言，这一点尤为重要，因为认证对象对应的是特定的器件配置，而不仅仅是接口标准。NAND 生成或流程的变化会影响到错误率、持久性和延迟行为。NAND 世代或制程发生变化，都可能影响误码率、耐久性以及延迟特性。

Ferri 产品家族正是采用这一设计理念，通过受控的 BOM 配置及生命周期管理机制，确保产品的一致性。不同 NAND 版本之间的器件不会被视为可直接替换（Drop-in Replacement）的产品，从而有助于长期保持认证样品与量产产品之间的一致性。

NAND 磨损和数据完整性管理

随着 P/E（Program/Erase）循环次数增加以及数据保持时间延长，NAND 的电气特性会逐渐退化。原始位错误率（Raw Bit Error Rate, RBER）会上升，数据保持能力逐渐下降，读干扰（Read Disturb）也会随着反复读取不断累积。

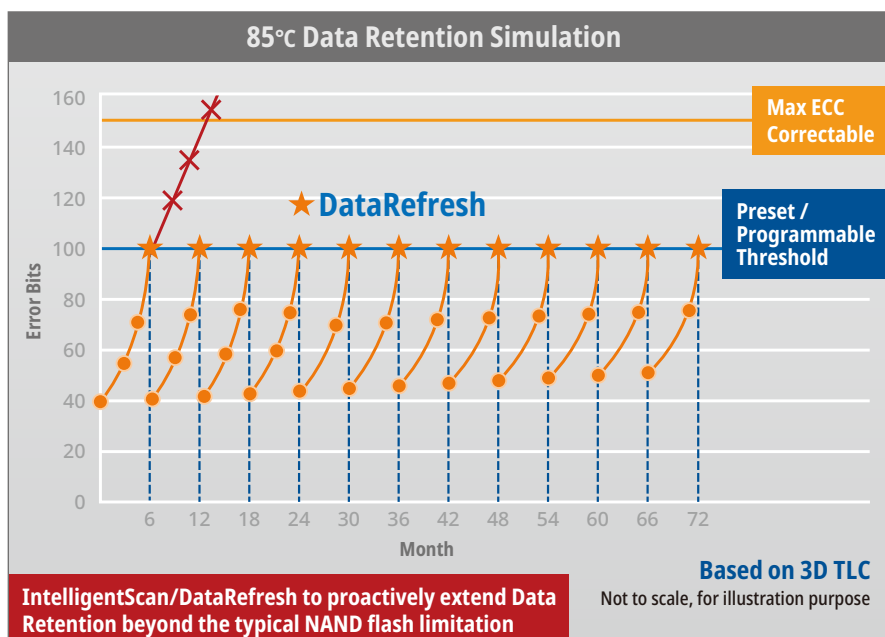
FFerriSSD 通过 NANDXtend 技术应对这一问题。该技术结合 LDPC 纠错算法与内部数据保护机制，即使 NAND 随着老化而性能下降，仍能有效保障数据完整性。



NANDXtend 有助于在保持数据完整性的同时延长 NAND 使用寿命

后台管理机制同样负责处理 NAND 老化带来的性能退化。IntelligentScan 持续监控 Flash Block 状态及误码率，提前识别接近磨损极限的存储区域。DataRefresh 会主动迁移数据，以维持数据保持能力，并降低长期读干扰造成的影响。

这些机制均在设备内部运行，对主机完全透明，无需主机额外介入，从而降低了系统层面对 NAND 老化进行额外管理的需求。



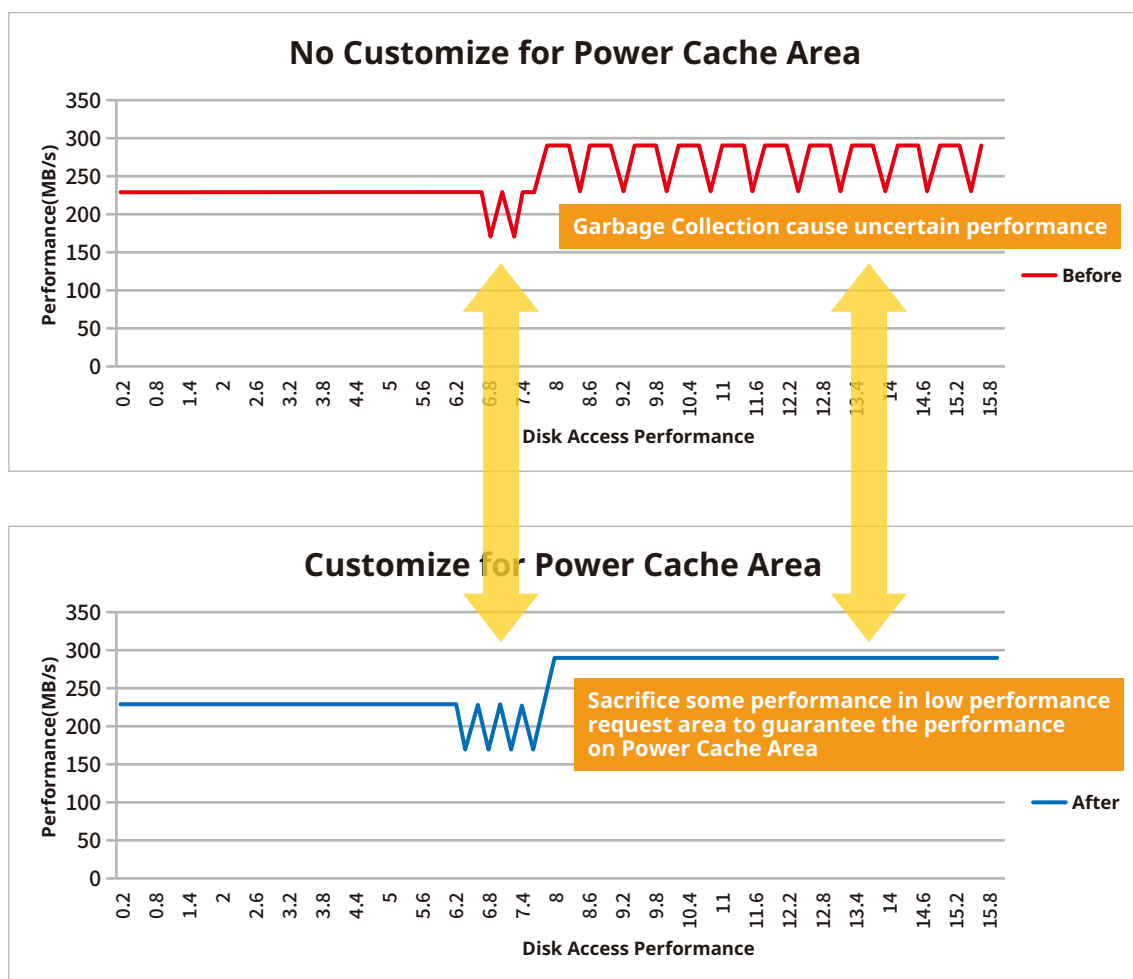
IntelligentScan 和 DataRefresh 增强了防数据丢失与纠错能力，从而延长了 SSD 的使用寿命

不稳定电源条件下的行为

电源波动是嵌入式系统中十分常见的运行环境。如果在编程（Program）或擦除（Erase）过程中发生掉电或电压跌落，映射表（Mapping Table）及元数据（Metadata）可能会处于不一致状态。

若缺乏有效保护，可能导致地址映射损坏、数据无法访问，甚至触发设备级恢复流程。

FerriSSD 内建电源异常保护机制，可在掉电过程中保护映射表完整性，并在系统重新上电后恢复至一致状态。具体执行因设备而异，但目标是防止在不完整运行过程中关键元数据结构的损坏。



IntelligentFlush™ 以稳定的速度进行即时数据迁移，让数据快速转移到安全的存储块。

设备级安全性

存储数据完整性同样依赖于防止设备遭受未经授权的修改。

FerriSSD 支持的安全功能取决于具体型号，如安全启动、固件验证和基于硬件的加密。这些功能可融入系统级安全架构，使存储设备本身成为可信安全链的一部分。

同一系统中的不同角色

嵌入式平台通常同时存在多种不同的存储需求。高性能子系统可采用基于 PCIe NVMe 的 FerriSSD 产品，以满足对数据吞吐能力和低延迟性能的需求。控制子系统通常对功耗和占板面积有更严格要求，因此一般采用符合 eMMC 5.1 标准的 Ferri-eMMC 产品。

采用同一产品家族中的存储器件，可通过统一的生命周期管理、技术支持和存储架构，简化系统整合、认证流程以及采购管理。部分子系统仍可能需要额外验证，以满足特定接口要求、功能规格或行业认证标准，但采用统一的存储平台有助于降低开发复杂度，并提升系统长期维护能力。

随着时间的推移保持一致性

长寿命系统面临的挑战是，如何使初始认证时的设备表现与后续量产批次保持一致。

组件级更改会导致延迟行为、错误率和后台管理活动的差异。这些变化并非始终立即可见，但随着时间的推移可能导致不稳定。

采用受控配置并提供明确生命周期支持的存储设备，可降低此类风险。认证阶段所验证的性能表现，在量产产品中依然具有代表性，从而减少了重新认证的需求，并降低了因组件差异引发现场问题的可能性。

这也简化了系统设计与支持工作：软硬件可基于稳定的设备特性进行开发，无需考虑随时间推移产生的变化。

长期行为重于峰值性能

在长期服务的系统中，峰值性能不如长期稳定运行重要。

慧荣科技的 Ferri 家族经专门设计，对 NAND 行为进行内部管理，并在整个产品生命周期中与经过验证的性能特征保持一致。产品整合、生命周期管控，以及对 NAND 性能衰退的内部管理，共同支持长期部署条件下的可靠运行。

这种一致性决定了系统部署后能否持续按预期运行，还是会出现难以诊断的间歇性故障。

要了解更多有关 Ferri 家族的信息，请访问
www.siliconmotion.com 或发送电子邮件至 ferri@siliconmotion.com