

T/ISC

团 体 标 准

T/XXX XXXX—XXXX

大模型训练用固态硬盘高速读写稳定性测试方法

Test method for high-speed read/write stability of solid-state drives
used in large-scale model training

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国互联网协会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 缩略语 3

5 测试原理 4

6 测试环境与条件 4

7 测试样品 5

8 测试负载模型 5

9 测试程序 6

10 测试数据处理与评价指标 10

11 测试报告 12

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国互联网协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

大模型训练用固态硬盘高速读写稳定性测试方法

1 范围

本文件规定了大模型训练用固态硬盘（SSD）高速读写稳定性测试的测试环境与条件、测试样品、测试负载模型、测试程序、测试数据处理与评价指标以及测试报告要求。

本文件适用于大模型训练场景下使用的固态硬盘（SSD）高速读写稳定性测试，测试对象为可通过标准主机接口进行读写访问和状态查询的完整SSD。高性能计算、大数据分析等具有长时间、高并发、高吞吐读写特征的应用场景可参照使用。

本文件不适用于SSD的电气特性、物理尺寸和可靠性寿命的测试与评价。9.6的供电或电磁故障注入仅用于评价规定扰动下的数据完整性和恢复表现，不构成器件电气额定值、寿命或完整电磁兼容符合性认证。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 9254.2—2021 信息技术设备、多媒体设备和接收机 电磁兼容 第2部分：抗扰度要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

大模型训练 large-scale model training

参数规模达到十亿级以上的人工智能神经网络模型的训练过程，涉及海量训练数据和周期性检查点保存操作。

3.2

固态硬盘 solid state drive

以半导体存储器为存储介质，配有控制器并通过规定接口与主机交换数据的非易失性存储设备。

3.3

重复读取稳定性 repeat-read stability

SSD在规定逻辑地址区间承受持续重复读取期间保持数据完整性和可访问性的能力。

3.4

延迟分布稳定性 latency distribution stability

SSD在规定负载和测试周期内保持读写操作延迟分布稳定的能力。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ECC：纠错码（Error Correcting Code）

IOPS：每秒输入/输出操作数（Input/Output Operations Per Second）

QoS：服务质量（Quality of Service）

SSD：固态硬盘（Solid State Drive）

TBW：总写入字节数（Total Bytes Written）

NAND：与非闪存（Not AND Flash）

CRC-32C：32位循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check 32）

PCIe：外围组件互连高速（Peripheral Component Interconnect Express）

5 测试原理

- 5.1 本文件的测试原理如下：
- a) 基于大模型训练场景中数据集加载、检查点保存及混合读写的 I/O 特征，构建相应负载模型，对 SSD 开展持续写入、数据完整性、重复读取稳定性、延迟分布稳定性和故障恢复测试；
 - b) 通过测试主机和数据采集设备，按规定的采样周期记录 SSD 的带宽、IOPS、操作延迟、介质错误、温度和功耗等参数；
 - c) 按照第 10 章规定的方法处理测试数据，并结合测试过程中的异常记录，对 SSD 在规定负载和环境条件下的高速读写稳定性进行评价。报告应区分测试方法执行结果与产品符合性结论；产品符合性判定应列明相应技术要求、限值及来源。
- 5.2 本文件描述的测试方法与以峰值性能为主要评价对象的性能测试相比，侧重 SSD 在长时间、高并发和混合负载条件下的性能波动、数据完整性及异常恢复情况。
- a) 测试负载包括数据加载、检查点保存和混合读写负载。
 - b) 测试过程中同步记录带宽、延迟、数据完整性和设备状态。
 - c) 测试结果按规定的计算方法表述，不以单次峰值作为稳定性结论。

6 测试环境与条件

6.1 硬件环境

硬件环境配置应符合表1要求。

表 1 硬件环境配置

项目	配置要求
测试主机	服务器级测试主机；接口类型、协议版本、通道数量和带宽应与被测 SSD 匹配，处理器、内存和接口资源应能够持续生成规定负载且不成为测试瓶颈；应记录处理器、内存、接口及系统资源利用率
转接装置	符合被测 SSD 接口和外形要求，不应成为供电、信号完整性或性能瓶颈；必要时应依据相应接口或连接器规范进行验证
数据采集设备	具备多参数同步采集能力；测量结果应具有可追溯的校准关系，并记录带宽、延迟、错误计数的分辨力、校准状态和测量不确定度；采样频率不低于 1 Hz
温控与供电设备	配置温控设备和稳压电源；应记录温度和供电测量的校准状态及不确定度，正常负载测试期间 SSD 直流输入应满足制造商规定的工作电压范围
电磁屏蔽装置	测试环境应配备电磁屏蔽装置，避免外部电磁信号对测试数据的干扰

6.2 软件环境

软件环境配置应符合表2要求。

表 2 软件环境配置

项目	配置要求
操作系统	采用受支持的服务器级Linux操作系统和稳定版内核；记录发行版、内核版本、缓存、交换空间、I/O调度策略及已关闭的非必要后台服务
测试软件	支持负载参数配置、持续写入、连续读取、混合读写和故障注入；能够采集SSD错误日志、延迟分布和SMART/健康信息，数据以结构化格式输出
驱动程序	采用SSD厂商正式发布的稳定版驱动程序或操作系统原生驱动程序，并记录驱动程序名称和版本
数据校验工具	支持采用CRC-32C对写入数据生成校验值并在读取时复核；SSD内部ECC状态通过设备日志或健康信息记录

6.3 环境条件

环境条件应符合表3要求。

表 3 环境条件要求

项目	要求
温度	23℃±5℃
相对湿度	应记录；测试期间应避免凝露
大气压力	应记录
电磁环境	实验室电磁环境应满足测试设备正常工作要求并予以记录；开展抗扰度试验时，按 GB/T 9254.2—2021 的适用条款执行
供电	测试主机供电应稳定；SSD 直流输入应满足制造商规定的工作电压范围，并记录各供电轨实测范围和纹波
机械环境	避免振动、冲击、凝露、粉尘和腐蚀性气体

7 测试样品

7.1 样品数量

同一型号、同一容量规格和同一固件版本的 SSD，测试样品数量应不少于 3 块；差异配置应分别成组并报告。各样品应分别完成规定项目并报告个体结果；不应用样品间平均值掩盖掉盘、数据不一致或未完成试验。补充样品不应替换并删除原失效样品记录。本文件规定的样品数量用于测试方法执行和样品间一致性观察，不用于推断产品总体失效率或完成可靠性认证。

7.2 样品预处理

7.2.1 测试前应先在未挂载的受测块设备上完成规定的全逻辑地址预处理，再建立 EXT4 或 XFS 文件系统。文件系统建立过程应无错误、无中断。第 8 章文件负载应记录挂载参数、有效文件总容量及缓存处理方式；9.4 的全逻辑地址测试应在未挂载的受测块设备上执行，并在该测试前完成 9.4.1 的全容量写入。不对已挂载文件系统直接执行覆盖全逻辑地址的写入。完成 9.4 后再次执行文件负载前，应重新建立上述文件系统和测试文件，并记录各项的执行顺序及累计写入量。

7.2.2 对样品进行预处理：采用 128 KiB 顺序写入方式覆盖用户可用逻辑地址范围，累计完成的主机有效写入量不少于用户可用容量的 2 倍；写入完成后使 SSD 在通电空闲状态下保持 30min，记录空闲前后的温度、健康状态和累计写入量。进入各正式负载后还应记录性能随时间的变化，不应仅凭完成预处理判定已达到稳态。预处理、预测试及其他项目的写入量应分别计量，不应抵扣 9.2 规定的正式写入量；保留测试前后健康状态和累计写入计数。

7.2.3 对样品进行外观与功能初检：外观无划痕、变形、引脚氧化等物理损伤；通电后通过测试主机识别样品，执行基础读写操作，确认样品无硬件故障，基础读写功能正常。

7.3 样品信息记录

应对每块测试样品进行唯一编号，并建立《测试样品信息表》，详细记录以下信息，确保样品信息可追溯。

- 产品基本信息：型号、生产厂家、生产日期、生产批次、容量规格、接口类型、额定连续读写带宽、额定随机 IOPS。
- 核心技术参数：闪存类型（MLC/TLC/QLC）、存储控制器型号、ECC 纠错算法、ECC 纠错能力、TBW 额定值、质保期限；各项应注明资料来源；标准接口不能提供的内部信息应注明未获取，不应据此推算纠错前错误率。
- 预处理信息：格式化文件系统、预老化写入数据量、预老化完成时间、初检结果。
- 其他信息：样品来源、包装状态、备注说明。

8 测试负载模型

8.1 数据加载负载模型

模拟大模型训练初期的海量训练数据加载场景，采用大文件连续顺序读取模式。第 8 章各负载应分别满足相应的最小时长或最小批次数要求；各范围内的测试配置应在测试前固定并保存，不应事后只报

告有利配置。本文件传输块采用KiB, 1 KiB为1024字节; MB、GB、TB分别按 10^6 、 10^9 、 10^{12} 字节计。第8章、9.2及9.5的队列深度为对单块受测SSD各负载任务配置的在途I/O深度之和; 9.4的目标区间队列深度按9.4.2配置。应同时记录任务数、各任务配置和实际深度分布。累计数据量按成功完成的主机有效数据字节计, 失败、取消和未完成请求分别记录, 不计入已完成量。具体参数要求如下。

- a) 测试文件: 采用容量为1 GB~100 GB的多文件集合; 测试文件的实际分配空间应覆盖声明的数据集; 读取前应完成文件内容初始化, 并采用直接I/O或经验证的缓存控制方法, 使所计读取实际到达受测设备。不应将稀疏文件空洞、文件系统压缩或去重产生的逻辑数据量当作实际设备传输量。
- b) 队列深度: 常规测试档为32、64或128; QD256可作为高并发强化测试档。
- c) 读取块大小: 4 KiB~128 KiB。
- d) 测试时长: 不少于1 h。
- e) 累计读取量: 报告累计成功读取数据量和数据集循环次数, 不设相对于SSD容量的固定倍数门槛。

8.2 检查点保存负载模型

模拟大模型训练过程中的周期性检查点数据保存场景, 采用随机写入模式。每个批次应有独立编号, 记录计划开始、实际开始、数据写入完成及持久化完成时间; 批次完成应包含文件同步或等效持久化操作, 不应把数据仅进入主机缓存视为检查点保存完成。应记录批次内的写入布局、并发进程及跨批次地址版本关系。应记录持久化操作的类型、返回状态及所作用的数据范围; 仅启用直接I/O不应作为已完成持久化的证据。具体参数应满足下列要求。

- a) 写入间隔: 1 min~10 min; 周期性保存阶段的间隔按相邻批次计划开始时刻之差计算; 应按计划持续提交批次, 记录延迟、积压及实际间隔, 不应通过跳过批次或延长间隔掩盖负载未按要求的执行。
- b) 队列深度: 常规测试档为32、64或128; QD256可作为高并发强化测试档。
- c) 写入块大小: 16 KiB~256 KiB。
- d) 单批次写入数据量: 512 MB~10 GB。
- e) 检查点批次: 应连续完成不少于10个检查点写入批次; 达到规定批次数后停止提交新批次, 并记录全部已提交批次的持久化完成情况和未完成状态。
- f) 累计写入量: 应报告检查点写入批次累计完成的有效数据量、测试耗时及其占用户可用容量和额定TBW的比例; 不设相对于SSD容量的固定倍数门槛。需要开展额外写入压力测试时, 按9.2执行, 不应以检查点结果替代持续写入稳定性测试结果。

8.3 混合负载模型

混合负载模型应模拟真实训练过程中的I/O交织, 应满足以下要求。

- a) 读写比例: 基准测试比例为8:2; 7:3和9:1可作为扩展测试比例。
- b) 块大小与队列深度: 基准测试的读取块大小和写入块大小均为16 KiB, 总队列深度为32; QD128可作为高并发强化测试档; 扩展测试采用其他块大小或读写比例时, 应在测试前固定并单独报告结果。
- c) 测试时长: 不少于4 h。
- d) 累计I/O数据量: 报告成功完成的读、写操作数和数据量, 不设相对于SSD容量的固定倍数门槛。
- e) 操作模式: 读写操作并行执行, 无先后优先级。读写比例按负载生成器提交的读写请求次数设定, 应保存生成规则或随机种子, 并分别报告实际提交次数比、完成次数比和完成字节数比; 不应为追求完成比例而隐藏失败、取消或未完成请求。并发读写应采用互不冲突的地址或明确的数据版本管理, 防止将预期覆盖误判为介质错误。报告应根据实际完成字节数说明负载的读写数据量构成, 不应把请求次数比直接作为字节数比或据此认定读密集、写密集。

9 测试程序

9.1 测试前准备

9.1.1 本文件规定测试均为设备级黑盒测试：在受控实验室环境下，通过 SSD 标准主机接口施加负载、校验数据并读取设备状态；除另有规定外，不使用厂商工程接口，不直接访问 SSD 内部物理页、物理块或 ECC 纠错前数据。样品应完成第 7 章预处理与初检。

9.1.2 按第 6 章搭建测试环境，完成硬件连接、软件安装与配置，校准或核查数据采集设备、温控设备、稳压电源，记录测量不确定度。样品端直流供电应记录各供电轨设定值、实测范围及纹波，正常负载测试期间应满足制造商工作电压范围；表 3 交流供电条件不作为 SSD 直流输入条件。表 1 中不低于 1 Hz 的采样频率用于连续状态记录；逐 I/O 延迟及故障注入波形应由事件计时或波形采集通道记录。应保存采样间隔、触发方式、时间同步误差及实际注入波形，不应用 1 Hz 状态记录证明瞬态扰动幅度和持续时间。

9.1.3 按 7.2 完成样品预处理与初检，安装至测试夹具，通电确认测试主机可正常识别样品且无硬件连接故障。

9.1.4 按测试需求配置负载模型参数、数据采集指标与频率，保存配置文件，测试开始前固定，测试中不应为改善结果临时更改负载。应记录 I/O 提交至完成的计时边界、时钟分辨率、校准及同步方法。同一比较组应保持命名空间容量、预留空间、写缓存策略、文件系统及测试顺序一致。目标配置未达到时，应报告配置与实测差异及原因，不应静默降低队列深度、数据量或时长后报告原档结果。

9.1.5 预测试完成后，第 8 章三类负载均应执行并分别记录完成时长、累计数据量及异常；满足相同负载配置和计量要求的 9.5 测试可同时用于 8.3 结果，不应用 9.2 连续顺序写入替代 8.2 周期性检查点保存。报告应列明各负载执行步骤及日志；8.2 规定的检查点批次应逐批保存独立计数与日志。

9.1.6 执行 5 min 预测试，检查测试软件、数据采集和样品工作状态。预测试无异常后结束并单独保存预测试配置与日志；正式测试计数器重新计数，预测试结果不计入正式统计。

9.2 持续写入稳定性测试

9.2.1 测试软件配置为连续顺序写入模式，以样品额定最大写入带宽为基准。基准测试采用 128 KiB 写入块、单任务总队列深度 32；QD128 可作为高并发强化档，与基准档分别报告。高 I/O 负载写入不施加供电过压；供电故障注入按 9.6 执行。应记录额定带宽对应的容量、测试配置及数据来源，并单独报告实际达成带宽；不应将额定带宽写成实际施加成功的带宽。

9.2.2 连续写入不少于 6h，且正式测试阶段累计主机有效写入量不少于用户可用容量的 3 倍；预处理、预测试及其他项目写入量不计入。实时记录写入带宽、IOPS、样品温度和功耗等参数。应同时满足时长和写入量要求后结束；报告应列明目标写入量、实际完成量及测试前后累计主机写入计数，不应以满足其中一项代替另一项。正式连续写入应采用完成的主机写入有效字节计数；NAND 内部写放大量、失败请求和其他项目写入量不应用于该门槛。满足两个结束条件后停止提交并等待在途请求结束，报告计量结束时刻及最终完成量；未处理完成请求列为异常。需要评价额外写入应力时，可按约定累计写入量开展可选强化测试，报告累计写入量及其占额定 TBW 的比例；强化测试结果单独报告，不作为常规测试合格判定依据。

9.2.3 测试中出现样品掉盘、读写中断、设备离线等严重异常时，立即停止测试，记录异常时间、当前写入数据量、样品温度、供电参数等信息，并分析原因。

9.2.4 正式写入结束时，立即记录样品温度、健康状态、错误计数和累计写入量并保存测试数据。需要测试后恢复观察时，应在测试前规定观察时间和设备状态并单独报告；恢复观察数据不应计入正式持续写入性能结果。

9.3 数据完整性测试

9.3.1 本测试可与 9.2 同步或单独执行；同步时实时校验写入数据，单独时先完成持续写入再全量回检。同步校验应读取已完成写入且版本确定的数据；全量回检应覆盖最终有效数据集，不应声称回检已被后续写入覆盖的历史版本。应分别报告累计写入版本数据量、已校验版本覆盖范围、未回检部分及最终有效数据集校验结果。重复读取同一版本不应充当新增写入版本的校验覆盖；不应以仅完成最终数据集回检声称所有历史写入均已校验。

9.3.2 对每批写入数据按固定数据块边界生成并保存 CRC-32C 校验值，采用 Castagnoli 多项式 0x1EDC6F41；应固定并记录初始值、输入与输出反转规则、最终异或值及数据块边界。读取时重新计算并比较，同时通过标准管理接口读取 SSD 介质错误、数据完整性错误及健康状态。CRC-32C 不一致时，

通过期望数据与读回数据逐位比较确定错误位数。通过 CRC-32C 校验的数据计入已完成校验数据量；该结果不等于所有数据均已逐位比较，也不表示校验不存在漏检。采用全量逐位比较时应单独说明，不应与仅 CRC-32C 筛查结果混作同一检验能力。

9.3.3 发现校验不一致或 SSD 报告错误时，应记录逻辑地址、数据长度、错误类型、错误位数或字节数、错误日志及发生时的带宽、温度和累计写入量。无法取得读回内容或不能确定错误位数时，应报告错误事件数及不应读数据量，不应将事件数或错误字节数直接作为错误位数代入式（3）。发生不可读、读取失败或数据不一致时，应保留数据完整性异常结论；即使其余可比较数据错误位数为零，也不应将该样品报告为全量数据无错误。

9.3.4 测试完成后，应分别统计写入校验错误数、读取校验错误数、SSD 报告的不可恢复介质错误数和数据完整性错误数，并分析错误与累计写入量、运行时间及温度的关系。不应分离写入与读取过程原因的校验错误，应报告为读回数据不一致，不应推定错误来源；设备报告事件数应与主机数据比较结果分别列示。

9.4 重复读取稳定性测试

9.4.1 对样品全容量写入，使用户可用逻辑地址范围均存有可校验测试数据；写入后在通电空闲状态保持 30min。应通过标准主机块接口直接覆盖该范围，测试期间不应挂载该范围文件系统或运行其他访问任务。后续文件系统负载测试前，应按 7.2.1 重建文件系统及所需文件并记录状态变化；本项全容量写入不应以文件系统内可分配文件容量替代。空闲结束后对用户可用逻辑地址范围完成一次数据校验，建立施压前基线；校验异常应在重复读取施压前单独记录，不应归因于尚未执行的目标区间试验。

9.4.2 在用户可用逻辑地址空间的低、中、高地址段各选一个连续、互不重叠的目标区间，每区间容量 1 GiB。采用 4 KiB 随机读取持续访问，总队列深度设为 128，不人为限速。应记录实际平均 IOPS、累计成功读取次数和累计读取数据量。区间起止地址按 4 KiB 对齐，并记录实际起止地址和容量。应固定并记录区间选择规则、随机分布及随机种子；4 KiB 请求不应越界。还应记录区间地址覆盖率及各 4 KiB 地址单元成功读取次数，统计口径见 10.4。低、中、高地址段仅表示主机逻辑地址位置，不表示固定物理 NAND 区域。

9.4.3 持续校验目标区间数据完整性。每区间重复读取时间不少于 30000 s；出现任一 CRC-32C 不一致、SSD 报告不可恢复介质错误、SSD 离线或目标逻辑地址不可访问时，应停止本轮测试，记录累计成功读取次数、累计读取数据量、SMART/健康信息及错误日志。累计成功读取次数为区间内已完成读取操作数，失败和重试请求分别计数，不计入该次数。

9.4.4 按低、中、高地址段顺序分别执行 9.4.2 和 9.4.3。每块样品应完成 3 个区间并分别报告，不应以算术平均值替代单区间结果。出现 SSD 离线、逻辑地址不可访问或数据不可恢复时，应停止测试并记录异常。出现规定停止事件时应保留该区间结果，另选区间不应取消既有异常；不能完成 3 个区间时，应列出未完成区间及原因，不应记为全部完成。每区间结束后、下一区间开始前，应对用户可用逻辑地址范围完成一次数据校验。施压前基线校验及各区间结束后的校验读取量应单独计量，不计入目标区间累计成功读取次数；应固定区间及校验顺序。事后发现异常应标明发现阶段，不应推定精确发生时刻或累计读取次数。设备不可访问时应停止后续操作并记录未完成范围。

9.5 延迟分布稳定性测试

9.5.1 按照 8.3 配置混合负载模型。基准测试采用 8:2 读写比例、读写块大小均为 16 KiB、单任务总队列深度 32；需要评价高并发压力时采用 QD128 强化档，并与基准档分别报告，启动混合负载测试。

9.5.2 按 8.3 规定的基准混合负载执行，测试时长应满足 8.3 要求。计时系统分辨力应不劣于 1 μ s。分别记录每次读操作和写操作的延迟，并同步记录带宽、IOPS 和温度等参数；报告计时分辨力、测量不确定度及主机端单次 I/O 提交至完成的计时边界。读写样本应分别保存；请求超时、失败和被中止的次数及等待时间应单独报告，不应从异常记录中删除。同一 I/O 的提交、完成及校验处理时间应分开记录，性能延迟不计主机完成通知后的 CRC-32C 计算时间；不应将吞吐采样周期或异步记录批次时长充当单次 I/O 延迟。

9.5.3 记录延迟分布异常信息：延迟突变的时刻、突变前后的延迟值、同步采集的样品工作参数，分析异常诱因。

9.5.4 测试完成后，停止混合负载测试，保存延迟数据与同步采集的所有参数，对延迟数据进行统计

分析。

9.6 故障注入测试

9.6.1 本测试为可选测试，适用于需要评估 SSD 故障恢复能力的场景；测试在 8.3 混合负载模型运行状态下开展，混合负载运行稳定后再注入故障。故障注入期间，仅对 9.6.2 规定的受扰参数施加所述扰动；其余环境条件应保持第 6 章要求。背景环境和实际注入扰动应分别记录，不应将注入波形与背景限值混为同一测量结果。

9.6.2 故障注入类型与参数。

- 短时供电边界扰动：在制造商规定的正常工作电压范围内实施。扰动持续时间应根据制造商电源时序、目标设备应用要求或测试方案在测试前确定；应在受测 SSD 供电输入端测量实际电压，记录受扰电源轨、额定电压、负载下基线、目标电压、实际波形、持续时间和恢复时间；不应以测试主机交流输入电压代替 SSD 受扰端电压。
- 电磁干扰：应按 GB/T 9254.2—2021 中适用于被测设备及端口的抗扰度试验项目、试验等级、持续时间、驻留时间、频率范围和重复次数实施；应记录所用条款、设备类别、端口、耦合方式、频率或波形、场强或电平及性能判据。报告应区分本次实际执行的项目与 GB/T 9254.2—2021 的完整符合性要求，不应仅凭本故障注入结果宣称通过全部抗扰度试验。
- 单盘读写阻塞：阻塞时间应根据目标训练任务、操作系统和存储栈的 I/O 超时配置在测试前确定；应记录设定阻塞时间、实际阻塞时间、未完成请求数及恢复过程。

9.6.3 每种故障类型应分别进行测试。每次故障注入后，应确认设备重新可访问、在途和后续 I/O 状态已确定、数据完整性校验完成，且温度恢复至第 6 章规定的测试条件后，方可进行下一次故障注入。未恢复时不应继续叠加故障。供电电压上、下边界注入应分别记录。

9.6.4 故障注入结束后，待样品工作状态稳定，对测试数据进行完整性校验，统计故障恢复时间、异常发生率，评估样品的容错能力与鲁棒性。故障恢复时间从注入结束计至样品重新完成读写且数据校验通过；未恢复样品应报告观察时长和终止原因。异常发生率应按出现异常的有效注入次数除以有效注入总次数计算，并分故障类型报告分子和分母。应分别记录供电恢复、接口恢复、首次成功 I/O 及完整性校验完成时刻；记录停止观察时刻。观察终止仍未恢复的，应报告未恢复状态及截至终止的观察时长，不应以该时长当作已恢复时间计算平均值。

9.6.5 测试过程中若出现样品永久性损坏、数据无法恢复等情况，立即停止测试，记录相关信息。

9.6.6 图 1 为测试流程概览。图中“读干扰稳定性测试”对应 9.4 规定的主机逻辑地址重复读取稳定性测试。第 8 章三类负载应按 9.1.4 执行，故障注入应在 9.6.1 规定的混合负载状态下开展；不应以图中节点的省略或位置替代相应条款的负载和执行要求。

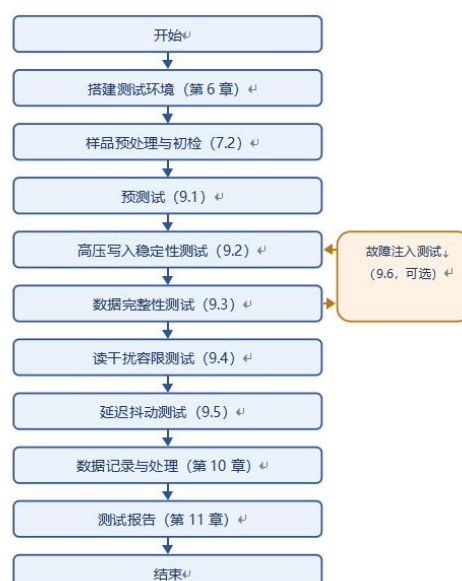


图 1 测试程序流程图

10 测试数据处理与评价指标

10.1 数据记录要求

10.1.1 测试数据应实时、完整、准确记录，采用 CSV、Excel 等结构化格式存储，单条数据应包含采集时间戳、测试指标数值、样品工作状态、环境参数等信息，无缺失、无篡改。若发生采集缺失，应保留缺失区间、原因和对结果的影响，不应插补成正常观测值；影响指标计算完整性时应复测并保留原记录。

10.1.2 对测试过程中的异常数据、异常现象进行单独标注，建立《测试异常情况记录表》，记录异常发生时间、异常类型、异常数据值、处理方式及处理结果，保证测试数据的可追溯性。

10.1.3 同一型号样品的测试数据按样品编号分类存储，测试完成后对所有样品的测试数据进行汇总，形成统一的测试数据集，数据集应包含原始数据、数据处理过程、计算结果。

10.1.4 测试数据的保存期限应不少于 3 年，并支持查询与复查；电子数据应进行备份。

10.1.5 数据记录字段应至少包括：测试项目、样品编号、采集时间戳、带宽（MB/s）、IOPS、读写延迟（μs）、错误数（bit）、温度（℃）、供电电压（V）、负载模型参数及备注信息。还应记录采样窗口起止时刻、该窗口完成的字节数和操作数、错误事件数、已校验比特数、校验覆盖范围及数据文件校验值。故障记录还应包含计划参数、实际波形或事件时间、恢复各阶段时刻及观察终止状态；读写量记录应区分提交量、完成量、校验覆盖量和设备健康计数。应记录测试与测量设备的校准状态、测量不确定度及其适用范围。

10.2 持续写入稳定性指标

10.2.1 实际带宽相对偏离率

实际带宽相对偏离率表征持续写入过程中，实测写入带宽相对于额定最大写入带宽的各等长采样窗口带宽绝对偏差之和占实际带宽采样值之和的比例，按公式（1）计算。

$$\eta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n |B_i - B_0|}{\sum_{i=1}^n B_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

η_1 ——实际带宽相对偏离率（%）；

B_i ——第*i*次采样得到的实际写入带宽，单位为兆字节每秒（MB/s）；

B_0 ——SSD制造商标称的额定最大写入带宽，单位为兆字节每秒（MB/s）；

n ——正式测试期间的有效采样次数。

实际带宽相对偏离率越小，表明额定带宽偏差相对于SSD实际输出带宽的影响越小。测试报告应记录各次带宽采样值、实际带宽采样值之和及实际带宽相对偏离率计算结果。

10.2.2 带宽波动率

表征持续写入过程中实际写入带宽相对于本次测试平均带宽的时间波动程度，按公式（2）计算，结果保留2位小数：

$$\eta_2 = \frac{\sum_{i=1}^n |B_i - B_{avg}|}{n \times B_{avg}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

η_2 ——带宽波动率，%；

B_i ——第*i*次采集的实际写入带宽，单位为兆字节每秒（MB/s）；

B_{avg} ——同一有效统计阶段内各等长采样窗口实际写入带宽的算术平均值，单位为兆字节每秒（MB/s）；

n ——数据采集总次数。

两个指标应采用同一测试阶段、同一采样周期和同一组有效带宽数据计算。预测试阶段的数据不计入计算；正式测试期间出现的带宽下降、异常波动和恢复过程数据不应删除，并应在测试记录中标明对

应时间和设备状态。采样窗口应等长连续；负载未中断但无I/O完成的窗口记零带宽，采集缺失按10.1处理。式（1）或式（2）的分母为零时，应报告无有效输出及原因，不应给出正常数值结果。

10.2.3 最低带宽维持时间

表征持续写入过程中SSD满足目标应用最低持续写入带宽的能力。该指标为实际写入带宽不低于规定最低持续写入带宽 B_{min} 的最长连续时间，单位为小时（h），结果保留1位小数。 B_{min} 应由产品技术文件、采购要求或测试委托方根据目标训练负载在测试前确定，并在报告中注明来源；未规定 B_{min} 时，不计算最低带宽维持时间，应报告平均带宽、P5、P50、P95及最小窗口带宽。测试期间带宽未低于 B_{min} 时，取实际测试时间。同时报告以秒计的未舍入持续时间及对应起止时刻；跨越采集缺失区间不应合并。该时间仅说明连续采样窗口平均带宽达到阈值，不证明窗口内每一瞬间均达到阈值；采样周期应与结果一并报告。还应使用同一采样数据报告低于 B_{min} 的累计时长、有效观测时长占比、最长连续区段及区段次数；采集缺失时间单独报告，不计入有效观测时长。同一比较组应采用相同采样周期。

10.3 数据完整性指标

10.3.1 主机可见检出位错误密度

表征实际完成校验的数据中，经逐位比较确认的错误位数与实际校验数据量之比，不等同于JEDEC规定的不可纠正比特错误率（UBER）。能够明确区分写入与读取错误来源时应分别计算；不能区分时应报告读回数据不一致。主机可见检出位错误密度按公式（3）计算，采用科学记数法并保留3位有效数字，同时报告错误位数及实际校验量；零观测错误不应表述为已证明真实错误率为零。存在无法逐位比较的错误时，应同时报告其事件数及不可读量；式（3）的可比较数据结果不应替代这些异常。校验量为零时不应计算。

$$\varepsilon = \frac{V_e}{V_t} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ε ——主机可见检出位错误密度，单位为比特每吉比特（bit/Gbit）；

V_e ——在校验覆盖范围内对校验不一致数据通过期望数据与读回数据逐位比较确定的检出错位位数，单位为比特（bit）；

V_t ——与 V_e 对应、实际完成规定校验的数据量，单位为吉比特（Gbit），1Gbit为 10^9 bit；不应以未校验的总读写量扩大分母。

10.4 重复读取稳定性指标

10.4.1 重复读取稳定性结果

表征SSD在主机侧重复读取条件下保持数据完整性、可访问性和读取性能稳定的能力。每个目标区间应报告累计成功读取次数、累计读取数据量、平均IOPS、最小IOPS、P1、P10和P50 IOPS、平均读取延迟、P99读取延迟、性能下降事件次数及最长持续时间，并报告测试前后SSD健康计数和累计写入量变化。出现CRC-32C不一致、不可恢复介质错误、SSD离线或逻辑地址不可访问时，应报告首次异常时刻、累计成功读取次数、累计读取量、受影响数据范围和设备状态。未出现规定异常时，应表述为在30000 s观察期及实际累计读取量内未检出规定异常，不应据此推断NAND物理单元的读取耐受次数。地址覆盖率为至少完成一次目标读取的不同4 KiB地址单元数与目标区间4 KiB地址单元总数之比；单位地址访问强度按每个4 KiB地址单元成功完成的读取次数统计，报告平均值、P50、P95和最大值。

10.5 延迟分布指标

10.5.1 表征混合负载模型下SSD读写延迟的分布特征，采用分位数统计方法，重点统计以下指标，单位为微秒（ μs ），结果保留整数：读操作与写操作应分别统计；原始样本保留实际计时精度。将各组完成操作的延迟按升序排列，分位数取样本数乘对应比例后向上取整的样本值，并报告各组样本数。分位数与最大值均针对该组成功完成I/O，超时及未完成请求的数量和已等待时长应并列报告，不能通过排除这些请求作出无尾延迟异常的结论。某组无成功完成I/O样本时，该组分位数和最大值应报告为无有效样本，并报告失败、超时及未完成请求，不应记为零延迟。

a) P50延迟：50%的读写操作延迟不超过该数值（延迟分布的中位数）。

- b) P99 延迟：99%的读写操作延迟不超过该数值。
- c) P99.9 延迟：99.9%的读写操作延迟不超过该数值。
- d) 最大延迟 (L_{max})：测试过程中成功完成的单次 I/O 最大延迟；应与对应请求发生时间、操作类型、设备状态及异常日志关联报告，不应仅依据单个最大值判定延迟稳定性。

11 测试报告

11.1 报告编制要求

测试报告应客观、准确、完整、规范反映测试过程与结果，语言专业、数据详实、逻辑清晰，无模糊表述，测试结果应与测试数据一致，报告编制人员应签字确认，对报告内容负责。

11.2 报告主要内容

测试报告应至少包含以下内容，格式采用标准化模板，可根据实际测试需求增加附件。

- a) 报告基本信息：报告编号、测试委托方、测试承接方、测试项目、测试开始时间、测试完成时间、报告编制人、审核人、批准人、编制日期。
- b) 测试依据：本文件编号及名称、引用的其他国家标准/行业标准/企业标准。
- c) 测试环境：硬件环境配置（测试主机、数据采集设备、夹具等型号与参数）、软件环境配置（操作系统、测试软件、驱动程序版本）、环境条件（温度、湿度、供电等参数）。
- d) 测试样品：样品基本信息、样品数量、样品编号、预处理情况、《测试样品信息表》。
- e) 测试方案：测试负载模型配置参数、测试程序步骤、数据采集指标与频率、使用的测试方法与算法；应列明基准档、扩展档或强化档的读写比例、块大小、总队列深度、任务数、单位换算、检查点批次计划、随机种子和故障注入条件，各档结果应分别报告；还应列明三类负载与执行步骤的对应关系、文件系统与块接口切换、持久化操作及 SSD 供电受扰测点；应记录各项目持续时间、累计成功读写量、数据集循环或检查点批次数、1GiB 目标区间位置、30000 s 重复读取顺序、地址覆盖率、单位地址访问强度、CRC-32C 配置与实际校验覆盖、Bmin 及其来源，以及测试与测量设备的校准状态、测量不确定度及适用范围。
- f) 测试数据：各项测试的原始数据汇总、数据处理过程、关键指标计算公式及计算结果。
- g) 测试结果：各单项指标的测试结果汇总与稳定性分析；按样品和项目分别列明执行完成、样品异常、测量无效及未执行状态，不应将不同状态合并记为通过。
- h) 异常情况说明：测试过程中出现的异常现象、《测试异常情况记录表》、异常原因分析、异常对测试结果的影响。
- i) 测试结论：逐项报告规定负载和环境条件下的测试结果、异常及测试完成情况；依据明确列明的目标应用性能和数据完整性要求，判断 SSD 是否适用于对应大模型训练场景，并针对不同规模及部署配置给出应用建议。未提供应用判定要求时，不应仅凭完成本方法测试作出普遍适用或产品合格的结论。
- j) 附件：《测试样品信息表》《测试异常情况记录表》、原始测试数据、测试设备校准证书、样品外观照片、测试环境照片等。

11.3 报告签署与发放

测试报告应经编制人、审核人和批准人签字，并按规定发放和归档；归档期限应不少于3年。