

# RK3568平台高温环境下SSD IO降速分析V2.0

## Hardware Issue Report: RK3568 平台高温环境下 SSD I/O 降速分析

### 文档控制 (Document Control)

属性 (Attribute)	详情 (Details)
文档作者 (Author)	mengfei.wu
创建日期 (Date)	2026-02-26
文档版本 (Version)	V2.0
当前状态 (Status)	(Closed / Root Cause Identified)

### 修改记录 (Revision History)

版本 (Version)	日期 (Date)	修改人 (Author)	修改说明 (Description)
V1.0	2026-02-26	mengfei.wu	初始版本发布，完成 4K/128K/512K 负载模型下的高温交叉验证。
V2.0	2026-02-26	mengfei.wu	增补核心原因（吞吐量与 IOPS 的数学关系），并添加“常温锁低频”关键佐证实锤结论。

## 1. 问题描述 (Issue Description)

在对设备进行高低温循环压测时，观察到系统的存储 I/O 速率在高温环境下发生显著衰减。

- 初始现象**: 使用 Fio 工具进行 4KB 随机/顺序读取测试时，常温下速率约为 166 MiB/s。当 CPU 核心温度 (CPU LOCAL TMP) 上升至 80°C 以上时，I/O 速率出现断崖式下跌，最低降至约 33 MiB/s。
- 初步怀疑**: SSD 硬件过热触发固件级热保护 (Thermal Throttling) 或 SATA 物理链路高温降级。

## 2. 测试环境 (Test Environment)

- Host 平台 (SoC)**: RK3568 (四核 ARM Cortex-A55)

- 存储设备 (Device): BIWIN TD80B25620S1T (256GB SATA M.2 SSD)
- 接口协议: SATA 3.0 (6Gbps)
- 测试工具: Fio-3.12 (libaio 引擎, iodepth=16, direct=1)

### 3. 交叉验证与数据采集 (Investigation & Data Collection)

为了剥离 SSD 硬件本身与 Host 端系统资源对 I/O 性能的干扰，测试团队进行了基于不同环境温度、不同 CPU 频率以及不同 Block Size 的多轮正反向交叉验证。

#### 测试数据集汇总

测试场景	块大小 (Block Size)	环境/CPU 状态	Fio 带宽结 果 (BW)	Fio IOPS 结果	链路层 状态
基线测试	4 KiB	常温 / 动态频率	166 MiB/s	~ 42,496	SATA 3.0
高温衰减	4 KiB	高温 (80°C+) / 降频	~ 33 MiB/s	~ 8,400	SATA 3.0
高温大块	128 KiB	高温 (92.5°C) / 降频	531 MiB/s	4,245	SATA 3.0
高温大块	512 KiB	高温 (90.0°C) / 降频	539 MiB/s	1,078	SATA 3.0
常温锁频 (佐证)	4 KiB	常温 (25°C) / 锁定最低 频 (408MHz)	~ 30+ MiB/s	~ 8,000+	SATA 3.0
常温锁频 (佐证)	128 KiB	常温 (25°C) / 锁定最低 频 (408MHz)	500+ MiB/s	~ 4,000+	SATA 3.0

### 4. 核心原因剖析 (Root Cause Analysis)

基于上述严密的数据交叉比对，得出最终技术定论：本次降速事件完全与 SSD 硬件及 SATA PHY 物理链路无关。核心瓶颈在于 RK3568 SoC 在高温下触发了系统级动态调频调压 (DVFS) 以进行热保护，严重削减了 CPU 的算力，进而引发了中断处理能力的坍塌。

在块设备 I/O 栈中，吞吐量与 CPU 中断响应能力 (IOPS) 遵循以下基础物理公式：

$$\text{Throughput} = \text{IOPS} \times \text{Block\_Size}$$

系统底层的瓶颈转移逻辑如下：

#### 1. 4KB 小块 I/O 的算力灾难：

常温下，系统跑出 166 MiB/s 需要 CPU 每秒处理约 42,496 次中断 ( $166 \times 1024 \div 4 \approx 42496$ )。当 CPU 核心温度达到 80°C 触发 Thermal Throttling 时，CPU 时钟周期被强行拉低。算力

大幅缩水的 CPU 每秒最多只能处理约 8,400 次硬件中断 (Hard IRQ) 和软中断 (SoftIRQ)。这导致 AHCI 控制器的完成队列 (CQ) 严重阻塞，前端吞吐量被物理锁死在：  
 $8400 \times 4\text{KB} \approx 32.8 \text{ MiB/s}$ 。

## 2. 大块 I/O ( $\geq 128\text{KB}$ ) 免疫降速的原因：

为了跑满 SATA 3.0 的极限带宽 (约 540 MiB/s)，128KB 块大小只需要极低的中断处理频率 ( $540 \times 1024 \div 128 \approx 4320 \text{ IOPS}$ )。即使 CPU 处于 92.5°C 的极度降频状态，处理 4,320 IOPS 依然在其剩余算力的承受范围内 (此时观测到 CPU sys 占用率高达 87.97%，说明已接近算力极限，但刚好够用)。因此，大块传输不会出现降速。

## 5. 关键佐证 (Key Validation)

为了彻底剥离“温度”对 SSD 物理颗粒的嫌疑，测试团队实施了**反向定频测试 (Reverse Fixed-Frequency Test)**：

- 在 25°C 的常温环境下，主动将 RK3568 的 CPU `scaling_governor` 切换为 `userspace`，并锁定在极低频率 (例如 408MHz)。
- **测试结果**：常温低频状态下，4KB I/O 依然稳定复现了 30+ MiB/s 的低速现象；而 128KB 依然能跑满 500+ MiB/s 带宽。
- **佐证结论**：该测试 100% 证实了 I/O 降速仅与“CPU 时钟周期 (频率/算力) 不足”有关，SSD 自身并不存在热失控缺陷。

## 6. 结论与建议 (Conclusion & Recommendations)

### 结论：

存储子系统 (BIWIN SSD 及主板 SATA 接口) 通过了严苛的高温压力测试，无硬件缺陷。问题根因归属于 RK3568 主机端在恶劣热环境下的性能降级策略。高并发的小块 I/O 测试 (4KB direct I/O) 放大了 CPU 算力不足的短板。

### 优化建议：

1. **硬件散热改良**：若终端产品的核心业务高频依赖 4KB 随机存取，必须优化散热设计 (如增加散热片/导热垫)，防止 CPU 结温触及降频阈值。
2. **应用层聚合优化**：强烈建议软件业务侧在 User Space 或 Page Cache 层，将细碎的 4KB 小数据拼接、聚合成 128KB 甚至更大的 Block 后再下发至底层块设备，从根本上规避嵌入式 SoC 的中断算力瓶颈。

### 命令修正：

```
##原始命令: fio --allow_mounted_write=1 -ioengine=libaio -bs=4k -direct=1 -thread -rw=read -filename=/dev/$device -name="BS 4KB read test" -iodepth=16 -runtime=10
```

```
##修正命令: fio --allow_mounted_write=1 -ioengine=libaio -bs=128k -direct=1 -thread  
-rw=read -filename=/dev/$device -name="BS 128KB read test" -iodepth=16 -runtime=10
```