

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—2026

AI 算力设备用超级电容器 高频脉冲功率 密度与能效测试规范

Test specifications for supercapacitors in AI computing devices: high-frequency
pulse power density and energy efficiency

（征求意见稿）

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国西部开发促进会 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 试验通用条件 1

 4.1 环境基准条件 1

 4.2 高低温扩展测试条件 2

 4.3 样品预处理要求 2

 4.4 测试终止判据 2

5 试验设备与仪器精度要求 2

 5.1 高频脉冲充放电测试仪 2

 5.2 数据采集系统 2

 5.3 辅助设备 2

 5.4 仪器校准 2

6 高频脉冲工况设定 2

 6.1 标准脉冲波形分级 2

 6.2 脉冲循环逻辑 3

 6.3 峰值电流设定规则 3

7 高频脉冲功率密度测试方法 3

 7.1 测试前准备 3

 7.2 脉冲稳态测试步骤 3

 7.3 峰值脉冲功率计算 3

 7.4 脉冲功率密度计算 3

 7.5 结果取值规则 4

8 高频脉冲能效测试方法 4

 8.1 测试流程 4

 8.2 脉冲充放电能效计算 4

 8.3 分类能效基准判定依据 4

9 数据处理、计算与结果判定 4

 9.1 数据有效性 4

 9.2 重复性要求 4

 9.3 合格判定规则 4

 9.4 结果表达要求 5

10 试验报告要求 5

参考文献 6

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。

本文件由锦州凯美能源有限公司提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：锦州凯美能源有限公司、中国长城电源技术有限公司、惠州市鸣曦科技有限公司、天津力神超电科技有限公司、中天超容科技有限公司。

本文件主要起草人：刘营、刘祖贵、李彦、代波、段泉滨、王欢。

本文件首次发布。

AI 算力设备用超级电容器 高频脉冲功率密度与能效测试规范

1 范围

本文件规定了AI算力设备（AI服务器、GPU/TPU算力集群、智算中心机架储能单元）配套使用的双电层超级电容器、混合型超级电容器单体及模组的高频脉冲功率密度、脉冲充放电能效的试验条件、仪器要求、仿真负载工况、完整测试流程、数据计算、结果判定与试验报告规范。

本文件适用于AI算力设备瞬时功率平抑、算力尖峰补偿、毫秒级功率支撑场景用超级电容器单体、模组。

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 34870.1 超级电容器 第1部分：总则
SJ/T 11861 超级电容器术语

3 术语和定义

SJ/T 11861界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

高频脉冲功率密度 high-frequency pulse power density

在规定AI算力高频脉冲工况下，超级电容器可稳定输出/吸收峰值脉冲功率与自身总质量/总体积的比值，分为质量脉冲功率密度（W/kg）、体积脉冲功率密度（W/L）。

3.2

脉冲充放电能效 pulse charge and discharge efficiency

同一组高频脉冲循环周期内，超级电容器脉冲放电总能量与脉冲充电总能量的百分比，反映高频脉冲下内阻损耗水平。

3.3

脉冲等效串联内阻 pulse equivalent series resistance

高频脉冲工况下，由欧姆极化、双电层极化共同构成的动态等效内阻，区别于直流静态DCR。

3.4

脉冲电压跌落值 pulse voltage drop value

脉冲放电峰值电流施加瞬间，超级电容器开路电压与脉冲稳态电压的差值。

3.5

脉冲占空比 pulse duty cycle

单脉冲周期内，脉冲放电持续时间与完整周期总时长的比值，AI算力场景典型占空比5%~30%。

4 试验通用条件

4.1 环境基准条件

若无特殊约定，全部测试在基准环境下开展：

- a) 环境温度：（25±2）℃；
- b) 相对湿度：40%RH~60%RH；

- c) 大气压强：86 kPa~106 kPa；
- d) 无强制气流直吹样品，样品表面风速 <0.2 m/s。

4.2 高低温扩展测试条件

AI算力机房典型温度区间，按需开展：

- a) 低温： (10 ± 2) ℃、 (0 ± 2) ℃；
- b) 高温： (40 ± 2) ℃、 (55 ± 2) ℃。

4.3 样品预处理要求

4.3.1 外观检查：无鼓包、漏液、极柱变形、绝缘破损，铭牌参数清晰完整。

4.3.2 容量校准：按照 GB/T 34870.1 恒流充放电法测定标称容量，实测容量在标称值 90%~110%范围内方可开展脉冲测试。

4.3.3 静置预处理：样品充电至额定电压 U_R 后，恒温静置 ≥ 12 h，开路电压波动 $\leq 0.5\%U_R$ 视为静置完成。

4.3.4 测试区间：AI 算力场景常用 SOC 区间 20%~90%，本文件规定在 SOC=90%、SOC=50%、SOC=20%三个点位分别测试脉冲性能。

4.4 测试终止判据

出现以下任一情况立即停止试验：

- a) 脉冲过程单体电压低于 U_{min} 或高于 U_R ；
- b) 样品表面温度超过制造商规定最高工作温度；
- c) 极柱、外壳出现发烫、鼓包、漏液、异味；
- d) 电压、电流采集数据连续 5 个周期畸变超 10%。

5 试验设备与仪器精度要求

5.1 高频脉冲充放电测试仪

5.1.1 输出能力：支持 100 Hz~10 kHz 可编程脉冲波形，峰值电流输出不低于样品标称最大脉冲电流 2 倍；电流上升沿 ≤ 1 μ s，满足 GPU 微秒级瞬态负载仿真。

5.1.2 控制精度：

- a) 电流控制误差： $\leq \pm 0.5\%$ FS；
- b) 电压控制误差： $\leq \pm 0.2\%$ FS；
- c) 脉冲时间分辨率： ≤ 0.1 μ s。

5.2 数据采集系统

同步采集电压、电流、温度，采样频率 ≥ 1 MHz，单周期采样点 ≥ 1000 点；

- a) 电压采集精度：0.01% FS；
- b) 电流采集精度：0.02% FS；
- c) 温度采集精度： ± 0.1 ℃。

5.3 辅助设备

恒温恒湿箱（温度波动 $\leq \pm 0.5$ ℃）、电子天平（精度 ± 0.01 g）、体积测量工装（精度 ± 0.1 mL）、绝缘电阻测试仪。

5.4 仪器校准

全部计量仪器需持有有效期内CNAS认可校准证书，每年至少1次整机校准。

6 高频脉冲工况设定

6.1 标准脉冲波形分级

依据智算中心GPU负载波动强度分为3级，对应不同算力场景，见表1。

表 1 感官、理化、微生物指标和有害物质限量

脉冲等级	适用算力场景	脉冲频率f	脉冲时长tp	脉冲周期T	占空比D	基准峰值电流参考
1级	AI推理轻负载	100 Hz	500 μs	10 ms	5%	100C
2级	混合训练/推理通用场景	1 kHz	100 μs	1 ms	10%	200C
3级	大模型高密度训练尖峰	10 kHz	30 μs	100 μs	30%	300C

6.2 脉冲循环逻辑

单周期顺序：脉冲放电阶段→静置缓冲阶段→脉冲充电阶段→静置缓冲阶段，循环连续≥1000个完整周期后采集稳态数据。

6.3 峰值电流设定规则

应符合：

- a) 脉冲峰值电流 I_p 按制造商产品规格书标称最大脉冲电流设置；
- b) 无标称值时，按静态 100C、200C、300C 三档分别测试。

7 高频脉冲功率密度测试方法

7.1 测试前准备

- 7.1.1 样品完成 4.3 预处理，调节至目标 SOC（90%/50%/20%）。
- 7.1.2 连接脉冲充放电设备，电压、电流采集线直接压接样品极柱，减小引线阻抗。
- 7.1.3 设置环境温度至基准 25℃，恒温静置 30 min。
- 7.1.4 选定对应等级脉冲波形（基准测试选用 2 级 1 kHz 标准波形）。

7.2 脉冲稳态测试步骤

- 7.2.1 启动脉冲循环，连续运行 500 个周期，消除初始极化不稳定。
- 7.2.2 继续连续运行 1000 个周期，同步全程采集电压、电流、温度时序数据。
- 7.2.3 提取第 600~1000 周期稳态数据，计算单周期峰值脉冲功率 P_p 。
- 7.2.4 切换 SOC 点位（50%、20%）重复步骤 7.2.1~7.2.3；
- 7.2.5 切换高低温环境、切换 1 级/3 级脉冲波形完整复测。

7.3 峰值脉冲功率计算

单周期脉冲放电峰值功率计算见公式（1）：

$$P_p = I_p (U_{oc} - I_p \cdot R_{ESR-p}) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

U_{oc} ——脉冲前开路电压，单位为V；
 R_{ESR-p} ——脉冲等效串联内阻，单位为Ω，由脉冲电压跌落值计算，见公式（2）：

$$R_{ESR-p} = \frac{\Delta U}{I_p} = \frac{U_{oc} - U_p}{I_p} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

U_p ——脉冲放电稳态电压，单位为V。

7.4 脉冲功率密度计算

7.4.1 质量脉冲功率密度

质量脉冲功率密度计算见公式（3）：

$$P_m = \frac{P_p}{m} \dots\dots\dots 3)$$

式中：

P_m ——质量脉冲功率密度，单位为W/kg；

m ——样品总质量，单位为kg；单体仅计电容本体，模组含外壳、汇流铜排、绝缘件。

7.4.2 体积脉冲功率密度

体积脉冲功率密度计算见公式（4）：

$$P_v = \frac{P_p}{V_{vol}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

P_v ——体积脉冲功率密度，单位为W/L；

V_{vol} ：样品外包络总体积，单位为L；模组含完整封装外壳。

7.5 结果取值规则

同一SOC、同一波形下1000个周期 P_m 、 P_v 取算术平均值，剔除超过平均值±10%的异常周期数据。

8 高频脉冲能效测试方法

8.1 测试流程

在7.2稳态脉冲采集周期内，积分计算单周期充电总能量、放电总能量：

- 设备积分采集单周期脉冲充电能量 E_{ch} （充电阶段电压×电流对时间积分）；
- 同步积分采集单周期脉冲放电能量 E_{dis} （放电阶段电压×电流对时间积分）；
- 连续 1000 周期能量数据取均值计算脉冲能效。

8.2 脉冲充放电能效计算

脉冲充放电能效计算见公式（5）：

$$\eta_p = \frac{\overline{E_{dis}}}{\overline{E_{ch}}} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\overline{E_{dis}}$ ：1000周期平均放电能量，单位为J；

$\overline{E_{ch}}$ ：1000周期平均充电能量，单位为J。

8.3 分类能效基准判定依据

- 双电层 EDLC 超级电容器：基准 1 kHz 脉冲下 $\eta_p \geq 93\%$ ；
- 混合型 HSC 超级电容器：基准 1 kHz 脉冲下 $\eta_p \geq 90\%$ ；
- 10 kHz 高频尖峰工况下，允许能效降低 2 个百分点为合格下限。

9 数据处理、计算与结果判定

9.1 数据有效性

每组测试至少留存1000个完整脉冲周期原始采集波形文件；原始数据不应人为平滑、滤波删减，仅允许剔除设备故障畸变数据。

9.2 重复性要求

同一样品重复3组平行测试， P_m 、 P_v 、 η_p 三组数据相对偏差≤3%，否则重新试验。

9.3 合格判定规则

满足以下全部条件判定该工况下脉冲性能合格：

- 实测脉冲功率密度≥产品标称脉冲功率密度；

- b) 脉冲充放电能效满足 8.3 对应品类下限要求;
- c) 脉冲全过程电压未超出 $U_{\min} \sim U_R$ 区间, 样品无发热、形变、漏液异常;
- d) 脉冲 ESR 未超过制造商标称脉冲内阻限值。

9.4 结果表达要求

测试结果需同时标注: 脉冲等级、频率、占空比、SOC、环境温度、质量功率密度、体积功率密度、脉冲能效、脉冲ESR。

10 试验报告要求

每份试验报告至少包含以下信息:

- a) 报告编号、试验日期、环境温湿度;
- b) 样品信息: 型号、类型 (EDLC/HSC)、额定电压、标称容量、标称脉冲功率、出厂编号、总质量、总体积;
- c) 试验设备型号、校准证书编号;
- d) 试验工况: 脉冲等级、频率、占空比、峰值电流、SOC 点位;
- e) 原始数据摘要: 脉冲 ESR、单周期平均充放电能量;
- f) 核心测试结果表: 各 SOC、各温度下 P_m 、 P_v 、 η_p ;
- g) 样品试验过程外观、温度异常记录;
- h) 测试结论 (合格/不合格);
- i) 测试人员、审核人员签字, 检测机构盖章;
- j) 典型脉冲波形截图、数据原始记录。

参 考 文 献

- [1] GB/T 6587 电子测量仪器通用规范
 - [2] GB/T 19862 电能质量监测设备通用要求
 - [3] SJ/T 11895 节能电梯用双电层超级电容器规范
-