IMMERSION COOLING | EIS | DIELECTRIC FLUID | SAFETY

EIS油品传感器守护浸没式冷却



从冷却液失控到可视化安全

01 **浸没式冷却的爆发**

50kW+机柜与BESS能量密度飙升，风冷极限推动液冷

02 **绝缘性能为何是生命线**

水分是第一杀手，击穿电压>35kV，体积电阻率>10^9 Ω·cm

03 **EIS技术原理**

0.1Hz-1MHz宽频复阻抗，解耦离子/极化/扩散

04 **五维一次解耦**

电导率/水分/水活性/介电常数/温度，tanδ评估

05 **劣化链条与失效机理**

H_2O → aW↑ → σ↑ → ε↑ → BDV↓，提前数周预警

KEY FOCUS

35B$+

2025数据中心液冷市场，CAGR 24%

10 ppm

EIS水分检测灵敏度极限

<100 pS/m

浸没液安全电导率阈值

3 months

传感器ROI，避免百万级损失

储能与算力底座：每一滴液都可被信任

CHAPTER 01 — 浸没式冷却崛起

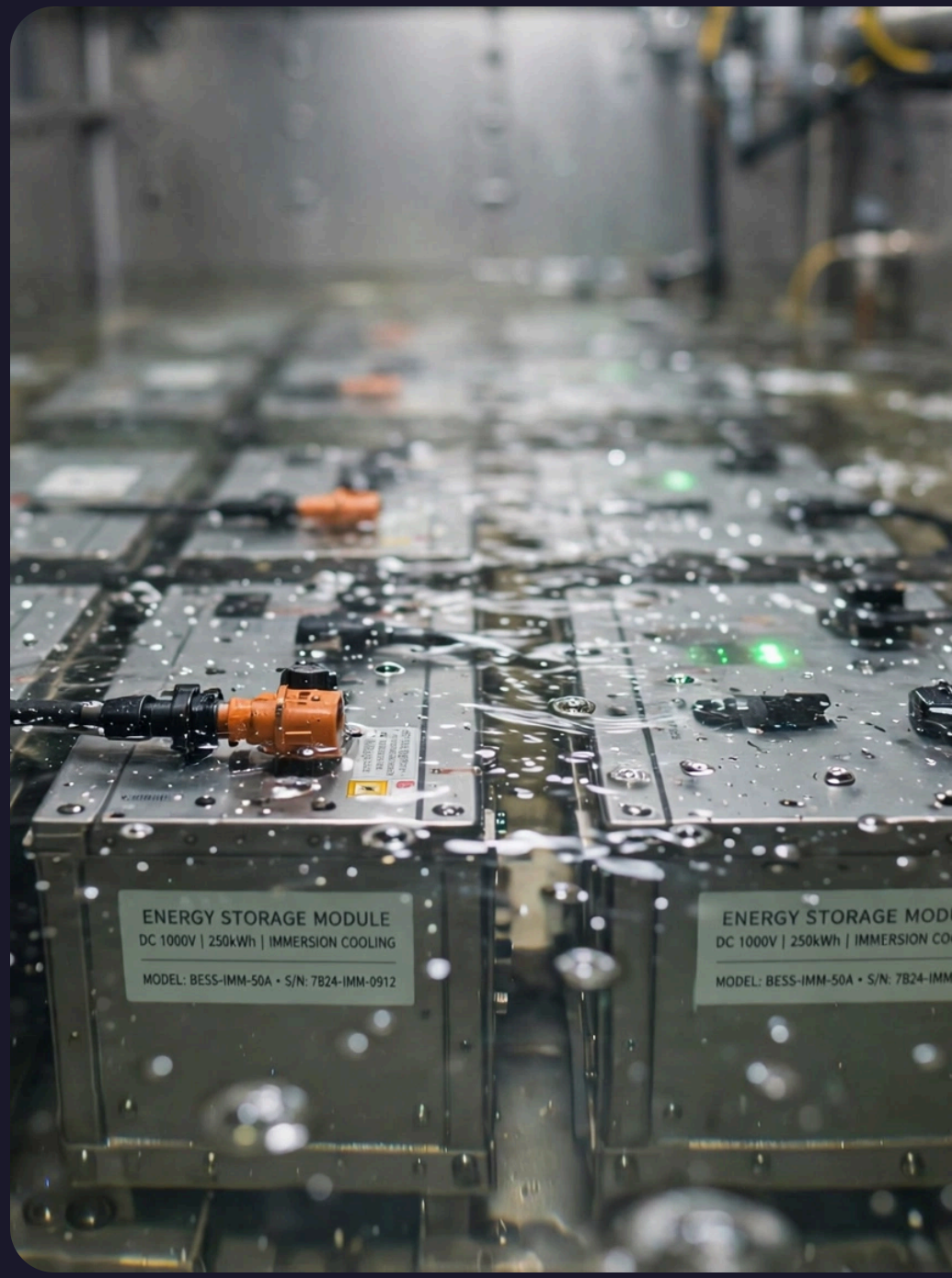
AI功耗与储能密度倒逼液冷

AI机柜 >50kW，风冷已达极限
单相浸没：矿物油/合成烃/PAO；两相：3M Novec, Chemours Opteon，PUE可从1.15降至1.03

电化学储能浸没首秀
Shell + QAES 2024发布全球首套电网级全浸没BESS，372kW/372kWh集群电芯100%浸没

绝缘性为第一性要求
体积电阻率 >10^9 Ω·cm，击穿电压 >35kV，介电常数新液2.0-2.2，污染>2.5即风险

$35B+	24% CAGR	100%
2025液冷市场规模	未来5年增长	电芯浸没率 Shell案例



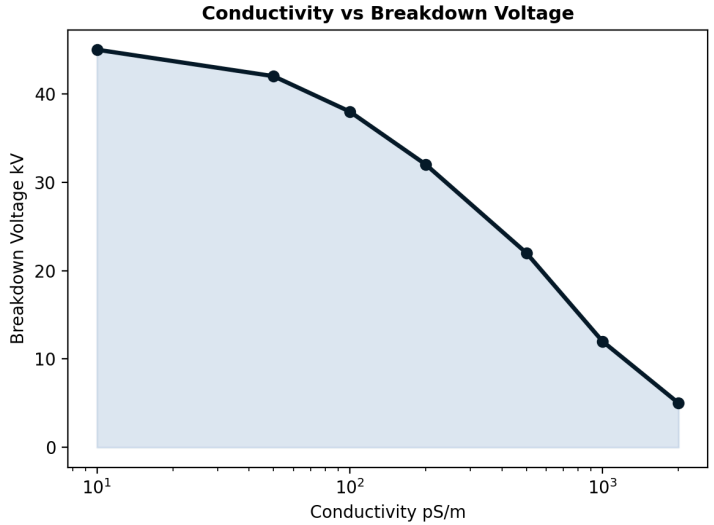
CHAPTER 02 — INSULATION IS LIFELINE

绝缘性能劣化即安全失效

水分是第一杀手

纯烃类新液 <100 pS/m，体积电阻率>10^9 Ω·cm。>50ppm水分即可使体积电阻率下降一个数量级，击穿电压直降30-60%。专利证实 water contamination can reduce dielectric properties leading to short circuit.

>10× 电阻率下降/50ppm **>$100k/h** 单机柜宕机损失 **数千万** BESS火灾损失



水污染四路径

- 环境湿气渗入 + 运维开盖引入RH
- 密封O型圈老化，材料析出极性物
- 冷凝与微气泡，击穿电压↓30%
- 助焊剂/金属磨损催化氧化，酸值↑

⚠ 链式反应触发

数据中心后果

- × 介电强度下降→主板针脚短路，电化学迁移
- × 腐蚀+局部放电，服务器突发宕机年均3次

Source: US Patent Immersion Cooling System

储能BESS后果

- × 电导率↑→漏电流→绝缘失效→热失控蔓延
- × 温差>5°C加速电芯衰减，SOE失衡

5× 寿命差异风险倍数

EIS为何适合浸没液：一次扫描读懂水、离子与极性

定义：小幅正弦激励，宽频 0.1Hz – 1MHz 测复阻抗 Z = Z' + jZ"

原位、无损、高灵敏，分离体电阻 R_s、界面电容 CPE 与 Warburg 扩散。构建 Nyquist / Bode 图谱指纹。

三过程解耦：体导电 × 界面极化 × 扩散

高频实部→离子导电，中频虚部→介电常数与极性氧化物，低频尾→水分弛豫峰偏移与气泡。

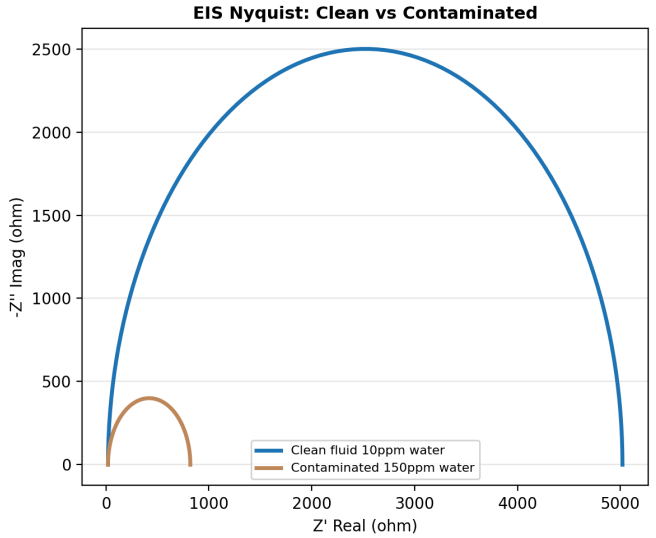
比传统方法早数周：10ppm级水分可辨

传统电导仪仅直流，水分靠离线卡尔费休。EIS可检测 10ppm水分、0.01pS/m电导率、ε 0.001变化，远高于电容式。

R_s + (Rct || CPE) + Warburg 等效电路 AI拟合提取参数，符合 ASTM D2624 温度修正

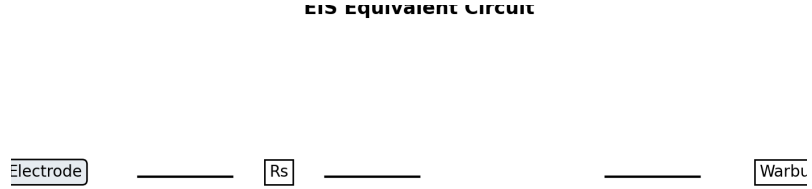
Clean 10ppm vs Contaminated 150ppm

半圆直径收缩 86%



等效电路模型

四电极 316L + PEEK



五大参数的EIS一次解耦，单次扫描获全谱

电导率 / Conductivity

高频区 Re(Z) 倒数 • 10kHz-1MHz

直接反映离子污染、金属析出。油品氧化产生羧酸盐离子化导电路径。

SAFETY THRESHOLD

< 100 pS/m 安全
>200 pS/m 旁路净化

水分与水活性 aW

低频容抗 + 介电弛豫峰偏移 • 0.1Hz-1kHz

水分子偶极弛豫峰移动。aW 0-1表征微生物腐蚀可用水。

SAFETY THRESHOLD

>50 ppm 需关注
aW >0.6 霉菌腐蚀风险

介电常数 ε / ε'

虚部电容计算 • 中频 1kHz-100kHz

极性污染与氧化产物使ε从2.0-2.2攀升。酯类水解尤其敏感。

SAFETY THRESHOLD

新液 2.0-2.2
>2.5 预示氧化或混入极性物

温度 T • NTC同步

宽带补偿 • ASTM D2624

所有电学参数温度强相关。紧邻探头补偿，消除10°C导致30%误差。

RANGE

-40至120°C
耐压10bar 精度±0.5°C

综合绝缘指数 tanδ

DDF = ε''/ε' • 能量损耗评估

由 Nyquist 半圆拟合得ε''，比电容法灵敏10倍，提前数周预警。

CAPABILITY

0.01pS/m 分辨
ε 0.001变化可辨



等效电路：R_s + (Rct || CPE) + Warburg，AI拟合提取参数，基线自学习

相比 DC电导仪 & 卡尔费休离线，EIS解耦水分-离子-极性污染

一表特征：高频→离子导电，中频→介电极化，低频→界面扩散与水弛豫。一次 0.1Hz-1MHz 扫频 ≈ 90秒完成五维。

绝缘劣化是一条可被EIS提前数周截获的链条

DEGRADATION CHAIN • 专利实证：水污染致短路

RH↑ 水分侵入 → aW↑ 水活性 → σ↑ 电导率 → ε↑ 介电常数 → tanδ↑ 损耗 → BDV↓ 击穿

化学：酯类水解产酸

氧化生成极性酸与金属磨损颗粒，催化氧化，离子载流子激增。

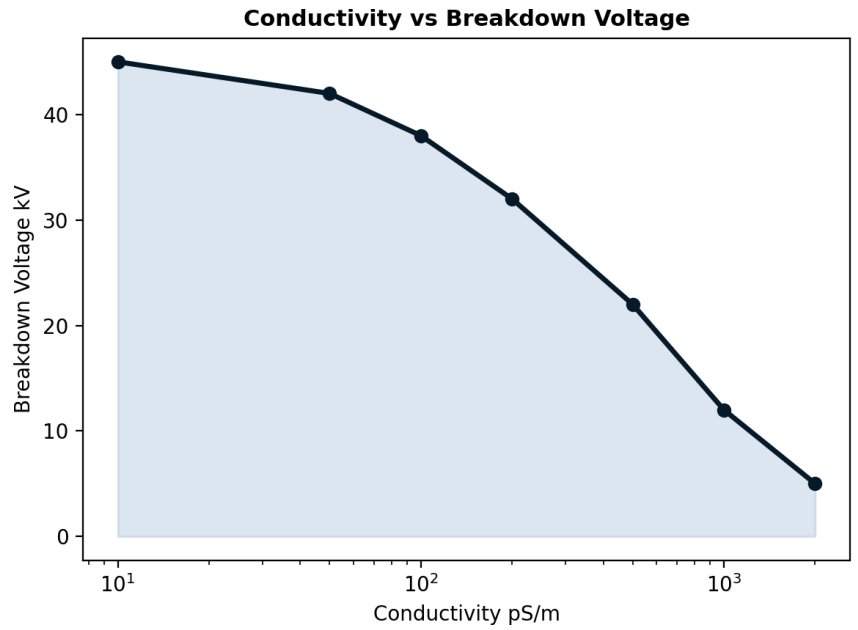
物理：微气泡 + 助焊剂析出

微气泡使击穿电压↓30%，电化学迁移致针脚短路，传统不可见。

EIS监测逻辑：pS/m 翻倍即一级告警，>500pS/m启动旁路净化与分子筛脱水，比离线击穿测试提前数周。

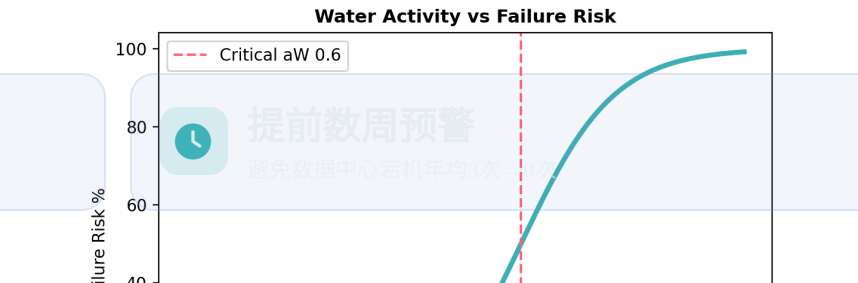
电导率↑击穿电压急降

Conductivity vs BDV



水活性 0.6 为失效拐点

aW vs Failure Risk



30% BDV↓

微气泡与水分共存，击穿直接损失

pS/m翻倍=一级报警

100→200 pS/m阈值，联动BMS/DCIM

提前数周预警

避免数据中心/岩机年均3次…



SHELL + QAES · 全球首套全浸没 BESS 2024

CHAPTER 06 — 储能电池安全场景

电芯100%浸没
温差与漏液零容忍

372kW / 372kWh 集群，每一滴冷却液都直接接触高压电芯。绝缘失效 = 漏电流 → 热失控。

痛点：吸湿与电芯漏液

密封失效、环境湿气、材料析出导致电导率飙升，温差>5°C加速衰减与寿命分化。

方案：EIS在线于回路

旁路安装，流速<1m/s，同步温度补偿，实时提取 Rs与CPE，联动BMS。

动作：自动脱水与告警

电导率>500 pS/m 或 水分>100 ppm 或 aW>0.6，启动分子筛脱水单元+隔离。

案例验证 3M FC-40 在电池热管理验证 / KIMM喷雾式浸没减少热失控蔓延

单相浸没槽开盖即引入风险，EIS把污染锁在回流管



20-40台垂直插入合成烃，运维开盖 RH 瞬升，O型圈老化析出极性物

失效模式

- 水污染致介电性能下降，water contamination can reduce dielectric properties leading to short circuit
- 助焊剂与金属屑析出，电化学迁移致针脚短路
- 微气泡+冷凝，板级腐蚀与局部放电

EIS闭环方案

- 四电极探头安装于回流管，流速<1m/s，避免气泡
- 介电常数 Δ>0.1 即提示污染，电导率>200pS/m 启动旁路净化
- Modbus TCP / OPC UA 接入DCIM，边缘阈值告警

联动逻辑： 实时温度补偿 → Rs + (Rct||CPE) 拟合 → CHI健康指数

3 → 0 次/年
美国超算中心意外宕机
接入EIS后

1.15 → 1.03
PUE 优化
净化后热交换效率回升

10 ppm
水分检测限
0.01 pS/m 分辨

欧美前沿已将EIS纳入SOP，从实验室走向全栈安全层

从美国超算到德国DIN标准浸没储能，EIS水分在线监测成为预防性维护的强制项，联动脱水与DCIM，宕机归零。

3次 → 0次
美国超算中心年均意外宕机，导入EIS后PUE 1.15 → 1.03

DIN EN 60296
德国MANN+HUMMEL浸没储能符合变压器油绝缘标准延伸

0.6 aW
芬兰Nortek临界阈值，专利absorption/desorption除水工艺

🇺🇸 美国 GRC + 3M ElectroSafe

ElectroSafe集成EIS模块，已在**Intel、Microsoft**数据中心规模化部署，水分在线监测写入运维手册，告警即启动旁路净化。

单相合成烃槽 20-40台垂直插入式 • 电导率>200pS/m触发

🇩🇪 德国 MANN+HUMMEL 浸没储能

电芯级喷雾浸没冷却系统集成EIS探头，实时监测介电常数变化>0.1即提示污染，满足车规级绝缘要求。

DIN EN 60296 • 316L+PEEK探头 -40~120°C 10bar

🇫🇮 芬兰 Nortek 数据中心

单相浸没 + EIS水活性监测，专利提出**吸脱附循环除水**，O型圈老化预警，避免针脚电化学迁移短路。

水活性0-1连续监测 • >0.6霉菌与腐蚀高风险

🇨🇳 中国 Shell + QAES 上海庆安

全球首套网级全浸没电池储能 372kW/372kWh，EIS为关键安全层宣称**reduce risks of thermal runaway**，3M FC-40验证。

3M FC-40 • KIMM喷雾冷却 • 联动BMS+分子筛脱水

标准演进 **IEEE C57.106** 变压器油标准延伸至浸没液 — **ASTM D924** 介电损耗、D2624 电导率温度修正、D7896 水活性 — 单一EIS等效电路 R_s+(Rct||CPE)+Warburg 即可同时满足。

让每一滴浸没液都可被信任 – 架构·部署·回报·未来

硬件架构

四电极EIS探头 316L不锈钢+PEEK，耐温-40至120°C，耐压10bar，频率0.1Hz-1MHz，流速<1m/s防气泡

算法与标定

R_s+(Rct||CPE)+Warburg AI拟合提取参数，基线自学习，自清洁脉冲，年度离线卡尔费休比对

部署最佳实践

旁路循环安装 回流管路，紧邻NTC温度补偿探头，避开泵后紊流，Modbus TCP/OPC UA上传

平台联动

边缘阈值+云端趋势 电导率>500pS/m或水分>100ppm触发脱水，计算Remaining Useful Fluid Life

全球标准延伸

IEEE C57.106 变压器油标准延伸至浸没液，符合 ASTM D924 介电损耗，DIN EN 60296

ROI < 3个月

传感器 vs 宕机/火灾损失

单传感器成本	单机柜宕机/小时
$3,000-6,000	>$100k
储能火灾	**意外宕机 3→0次/年**
数千万级	PUE 1.15→1.03

趋势与融合

- **芯片化降本50%** EIS ASIC从高端数据中心向边缘机房、EV电池包渗透
- **多模态数字孪生** EIS + 光学颗粒 + 温度场，构建冷却液健康指数 CHI
- 绝缘性能可视化是AI时代算力与能源安全的底座

Q&A / 开放讨论 · 附录：EIS Nyquist图谱示例与等效电路模型

感谢聆听