

通过 pS/m 电导率监测预见油品性能演变

Agenda · 报告结构

1. **什么是 pS/m 电导率**
   定义 / 典型范围 / 影响因素 / ASTM 标准
2. **老化如何改变电导率**
   氧化四阶段模型与静电恶性循环 ESD
3. **传统油品参数与盲区**
   TAN / 粘度 / 颗粒度为何滞后 3-6 月
4. **pS/m 的五大核心优势**
   超早期预警 / 溶解度 / 在线监测 / 安全 / 综合指纹
5. **漆膜指数 MPC 与 pS/m 关系**
   双阶段模型 · 风险矩阵 · 预警公式
6. **案例与实施路径**
   汽轮机 / 液压系统 / 传感器部署与闭环

关注焦点

PARAMETER A

pS/m 电导率

10^{-12} S/m，衡量可移动极性电荷，反映油液溶解负载

PARAMETER B

MPC 漆膜指数

ASTM D7843，ΔE 量化析出风险，事后确认型指标

CORE VALUE

提前 6-8 周

pS/m 比 TAN 早响应，在 MPC<15 时已显著上升

SAFETY

ESD 风险管控

<100 pS/m 高静电风险，>500 pS/m 高污染警报

什么是油品的电导率 · pS/m

picosiemens per meter = 10^{-12} S/m · 衡量油液传导静电荷与极性物质承载能力

DEFINITION

非极性油中可移动电荷的浓度度量

基础油本身几乎不导电，电导率来自极性添加剂、氧化产物、金属离子与水分，数值越高代表油液中可迁移的极性载荷越多

典型范围

新净透平油 Group II/III	<10 pS/m
抗磨液压油 HM	100-500
航空燃油安全阈	>400
高氧化警报	>800

决定因素 FOUR DRIVERS

基础油：Group II/III 极低，Group I 较高
添加剂：ZDDP、抗氧剂、清净剂贡献极性
降解产物：醛、酮、羧酸离子
污染：金属离子、游离水大幅抬升

ASTM **D2624 / D4308** 实验室杯法与现场传感器均以 20°C 或 25°C 温度补偿为基准，具备可比性



现场秒级可测 · 手持或在线三合一探头

显示 118.4 pS/m @24.6°C，同步记录温度与介电常数，用于趋势 AI 建模

老化过程如何改变电导率

四阶段演化模型：新油低导 → 极性累积跃升 → 饱和拐点，伴随静电恶性循环

阶段 0 新油

非极性主导

基础油分子非极性，添加剂包裹，离子迁移率极低

<8 pS/m · Group II/III 典型

阶段 1 初期氧化

醛 / 酮 / 羧酸生成

极性基团缓慢增加，电导率线性缓升

+20% ~ +50% · 持续数月

阶段 2 核心跃升

可溶漆膜前驱物暴增

大量软污染物溶于油中，可移动电荷激增

+50% ~ +300% · 预警黄金期

阶段 3 析出

不溶漆膜析出

极性物质从液相脱离，液相电导率出现拐点回落或波动

增速放缓甚至微降

⚡

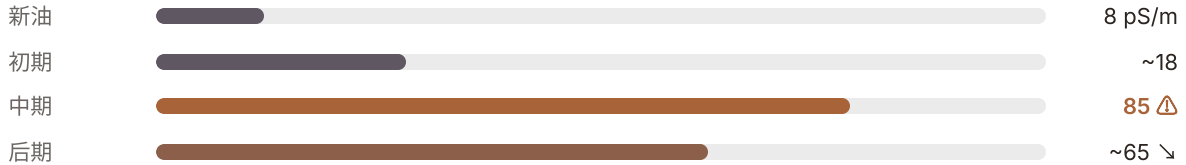
ESD 静电恶性循环

低电导率 <100 pS/m 过滤时电荷无法泄放 → 放电产生微火花 → 局部高温加速氧化 → 产生更多极性产物 → 循环加剧阀卡涩



漆膜实拍
氧化聚合物在金属表面龟裂堆积

ELECTRICAL TREND ILLUSTRATION



传统油品性能参数总览

多为离线、滞后、单维度检测，难以捕捉可溶性软污染物阶段，对漆膜失效预警不足

物理指标

- **粘度 @40°C**：基础流动性，早期氧化不敏感
- **粘度指数 VI**：温度稳定性，变化极慢
- **倾点 / 闪点**：工况安全边界而非健康趋势

化学指标

- **酸值 TAN**：氧化酸性产物累积后才上升
- **碱值 TBN / RULER**：抗氧剂残余量，不反映溶解度
- **RPVOT 氧化安定性**：实验室加速，离线周期长

污染指标

- **颗粒计数 ISO 4406 / NAS**：只看硬颗粒，漏掉 80% 软污染
- **水分 ppm**：重要但仅是诱因之一
- **元素光谱**：金属磨损，无法看清漆膜前驱物

漆膜专项

- **MPC ΔE / ASTM D7843**：滤膜比色，ΔE 量化析出物
- **超显微计数**：识别清漆颗粒形态与数量
- **局限**：离线 48h，且析出后才明显变化

关键局限 **滞后 3-6 个月** · 传统指标从“健康”到“结漆”存在数月的亚健康空窗期，无法预警可溶性漆膜潜势，需要更早的溶解度负载探针。

传统参数的盲区 · 为什么需要电导率

01 **TAN / RPVOT 严重滞后**

化学反应已大量发生后才抬升，滞后 3-6 个月，无法指导早期干预

02 **颗粒计数看不见“软污染”**

NAS / ISO 4406 只能捕捉不溶硬颗粒，80% 的漆膜问题来自可溶性前驱物，完全漏检

03 **粘度 & RULER 各看一角**

粘度对早期氧化不敏感；RULER 只看抗氧剂残余，不看油液溶解度崩塌

04 **MPC 本身是事后指标**

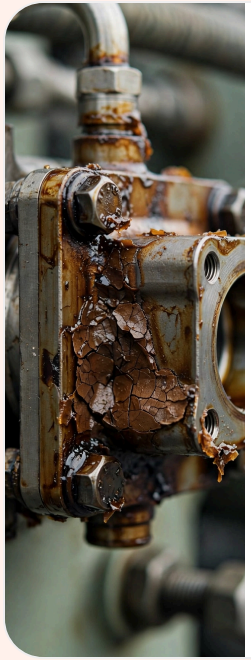
ASTM D7843 需 48h 离线比色，只有在污染物开始析出后 ΔE 才快速上升

从“健康”到“结漆”的亚健康空窗期长达数月

传统指标在此阶段全部显示“正常”，而油液的极性负载已饱和，这是故障的起点也是最佳干预窗口

60-90 天

传统方法无法预警的潜势期

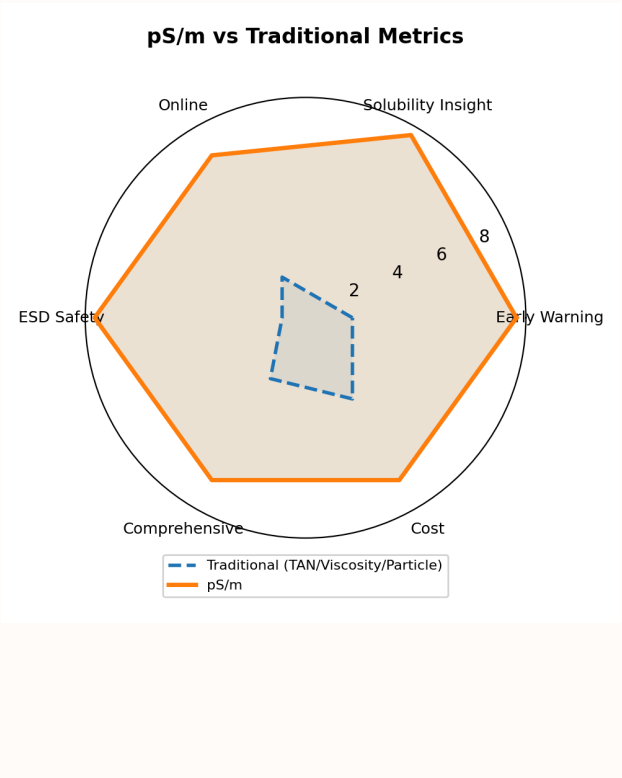


后果：阀卡涩 · 轴承高温 · 非停

一旦漆膜析出，MPC 飙升，已需机械清洗+换油，成本>200万

pS/m 电导率的 5 大核心优势

相对 TAN / 粘度 / 颗粒度等传统参数，pS/m 是更早、更全、更在线的“前置雷达”



雷达对比：在早期预警、溶解度洞察、在线监测、ESD安全、综合度五个维度，pS/m 全面领先传统化学指标。

01 EARLY WARNING

超早期预警，灵敏度是TAN的10倍

在 MPC 仍 <15 时，pS/m 已上升 50-200%，提前 4-8 周捕捉可溶性漆膜前驱物。

02 SOLUBILITY CRISIS

直接反映溶解度危机

衡量油液容纳极性污染物的剩余能力，预判何时从“亚健康”向析出转变。

03 ONLINE 24/7

在线、连续、低成本

固态传感器秒级响应，无试剂，三合一探头可长期安装于回油管路，边际成本趋零。

04 ESD SAFETY

同步评估静电放电风险

<100 pS/m 高ESD风险，<500 pS/m 需e-protect滤芯；同时阻断 ESD→氧化恶性循环。

05

综合健康指纹，适合 AI 趋势建模

一个参数融合氧化、添加剂消耗、金属离子、水分、静电倾向多维信息：Varnish Risk = a·ΔpS/m + b·MPC + c·TAN。可构建剩余清漆寿命预测模型。

pS/m 测量技术与趋势解读

实验室：ASTM D2624 静态杯法
校准基准，温度补偿至 20°C/25°C，精度 ±1 pS/m

在线传感器：电荷衰减法 / 微电流法
固态三合一探头（pS/m + 介电常数 + 温度），秒级响应，24/7 趋势

解读三要素：绝对值 · 变化率 · 拐点
d(pS/m)/dt 比绝对值更敏感；拐点出现代表溶解饱和析出开始

与介电常数协同判据
介电常数反映整体极化，pS/m 反映可移动电荷，二者叉分可区分“漆膜前驱物”vs“酸性物质”

健康区间速查

高静电风险	<50 pS/m
典型透平油新油-正常	50-300
潜势累积，需关注	300-800
高极性污染/氧化警报	>800

实操建议
建立新油基线 ×3 次平均，报警：+100% 预警，+200% 行动。所有值均做温度补偿后对比。

ASTM D4308 适用于在线标定 · 无需试剂

漆膜指数 MPC / Varnish · 事后确认型指标

漆膜是氧化聚合物从可溶软污染物转变为不溶硬沉积物的结果，导致阀卡涩、轴承高温、换热器失效，MPC 则是其析出后的量化度量。

ΔE

ASTM D7843 比色法
0.45μm 滤膜截留不溶物，比色计测量色差，48h 离线周期

只看已析出部分
可溶性潜势阶段 MPC 仍 <15，无法预警，80% 风险漏检

正常
<15
健康，定期监测即可

关注
15-30
潜势向析出过渡，启动验证

异常
30-60
已明显析出，计划净化干预

严重
>60
高故障风险，需清洗或换油

形成机制四步链

抗氧剂耗尽
RULER下降
→
可溶物累积
清漆潜势↑
pS/m↑
→
饱和析出
溶解度崩塌
→
不溶漆膜
MPC飙升

pS/m 在第②阶段即显著上升，MPC 到第④阶段才响应，时间差 6-8 周

为什么 MPC 需要 pS/m 作为前置雷达？

现场统计：pS/m 超过基线 2 倍时，未来 90 天内 MPC>30 的概率 >75%。将“事后确认”变为“事前预测”。

pS/m 与漆膜指数的内在关系

A

阶段 A：潜势累积期 · 溶解度负载上升

可溶极性产物离子迁移率增加 → pS/m ↑ 50%~200%，而 MPC 仍 <15，RULER 已下降。油液"载荷"已满但未析出。

pS/m 敏感 · MPC 静默 · 最佳干预窗口

B

阶段 B：析出期 · 从软污染到硬漆膜

饱和后极性物质脱离液相，液相导电物减少 → pS/m 增速放缓或微降，MPC 从 15 快速冲到 40+，颗粒数上升。

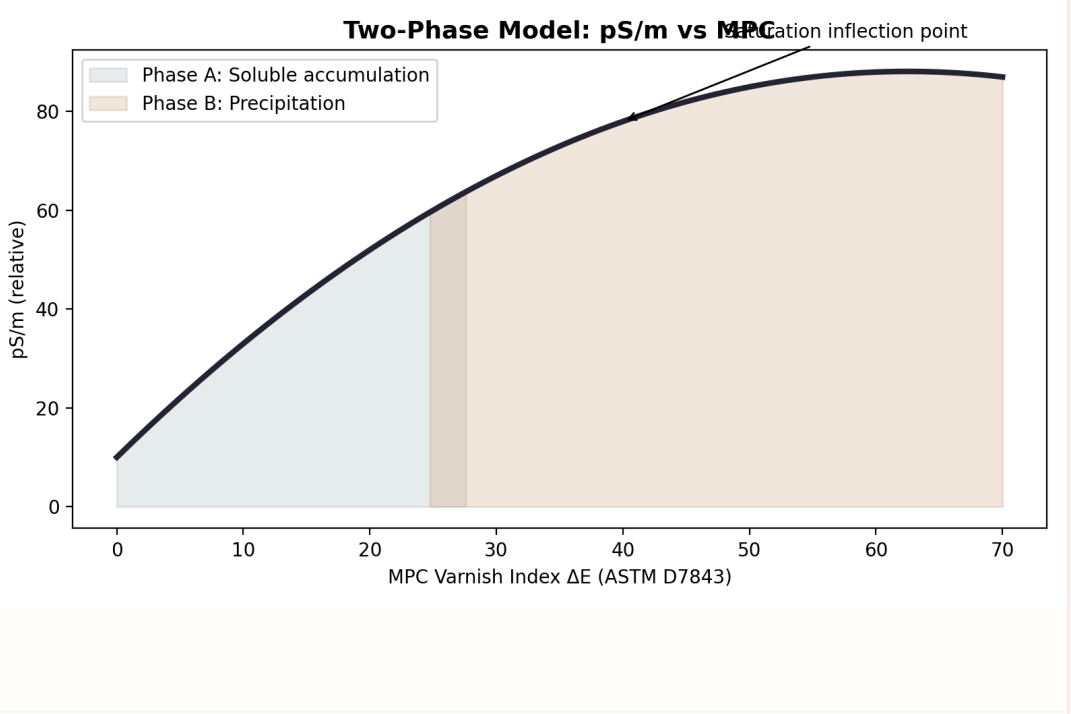
MPC 飙升 · pS/m 拐点 · 需机械清洗

机理 **pS/m 是因，MPC 是果。**可溶前驱物增加离子载体 → 电导率上升；过饱和析出后液相导电物质被消耗，形成拐点。联合趋势可将 MPC 的"事后确认"变为 pS/m 的"事前预测"。

2× 基线
pS/m > 正常基线 2 倍时
未来 90 天内

>75%
MPC >30 概率
现场统计验证

6-8 周
比 TAN 提前响应
比 MPC 提前预警



双阶段模型示意图：横轴 MPC ΔE (ASTM D7843)，纵轴相对 pS/m。阴影 A 为可溶累积，B 为析出；拐点即饱和点。

!

价值闭环

Varnish Risk Index = a·ΔpS/m + b·MPC + c·TAN ，将在线电导率纳入剩余清漆寿命预测。

相关性图谱 · pS/m + MPC 联合风险矩阵

GREEN · 健康
低 pS/m 变化 (<50%) + 低 MPC (<15)
维持常规监测 · 按计划取样

YELLOW · 高潜势
高 pS/m 变化 (>50%) + 低 MPC (<25)
启动静电吸附 / 补充抗氧剂 · pS/m 提前 6-8 周预警窗口

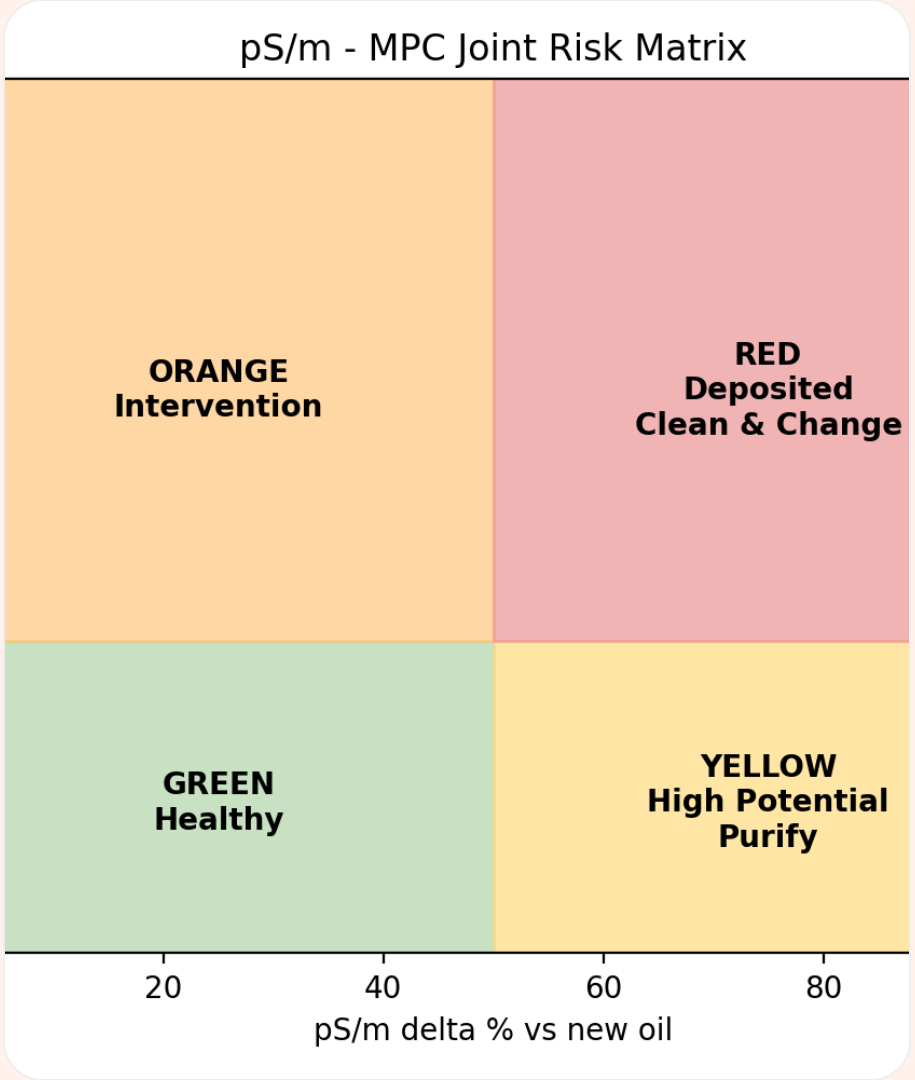
ORANGE · 介入窗口
高 pS/m + 中 MPC (25-40)
投用离子交换树脂 ICB / 静电清净机 · 周度跟踪

RED · 已析出
pS/m 增速回落或下降 + 高 MPC (>40)
需机械清洗 + 换油，液相电荷载体已转移为固相漆膜

Varnish Risk Index = a·ΔpS/m + b·MPC + c·TAN

现场统计：当 pS/m > 基线 2 倍时，未来 90 天内 MPC>30 的概率 >75%，实现“事前预测”替代“事后确认”。

读图逻辑：横轴为 pS/m 相对新油变化率，纵轴为 MPC。向右代表溶解负载加重，向上代表已析出量，轨迹通常为 右 → 右上 → 左上。



温度补偿至 20°C 后对比 · 基线取新油 3 次平均 · 黄区为最佳经济干预点

汽轮机与液压系统 · 两个预警实战

01

燃气电厂 · 透平油 ISO VG32 · Group II 基础油

新油 8 pS/m → 18个月后 85 pS/m，提前8周预警避免非停

pS/m @20°C	TAN mgKOH/g	MPC ΔE
8 → 85 (10.6x)	0.05 → 0.12	5 → 18

TAN 几乎未动，传统判据显示“正常”；触发 +100% 预警后取样 MPC 验证，投用静电吸附净化，MPC 回落至 12。

价值 >200万 · 避免一次伺服阀卡涩非停

02

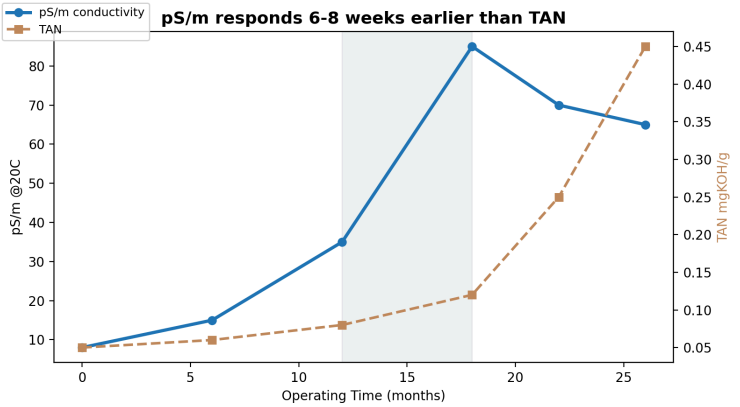
注塑机 · 抗磨液压油 HM · 无锌配方

300 → 1200 pS/m，伴随 ESD 放电导致伺服阀卡涩

高流速过滤产生静电，低电导滤芯加重放电；更换高电导 e-protect滤芯 + 离子交换树脂净化，电导率稳定回 400 pS/m 区间，阀位波动消除。

Group II/III + 无锌 = 低导高风险组合，必须监控

EVIDENCE · pS/m 比 TAN 早 6-8 周响应



实测：12-18月 pS/m 已跃升至峰值时，TAN 仍在基线；拐点后 MPC 才快速上升

通用经验沉淀

- 建立三次数新油基线，+100% 关注、+200% 行动
- 低导油优先选导电滤芯，消除 ESD 诱因
- pS/m 预警 → MPC+RULER 复核 → 净化闭环

总结与展望 · SUMMARY & NEXT

pS/m 不是替代，而是传统参数的“前置雷达”

CAUSALITY

pS/m 是因，MPC 是果

电导率反映溶解负载饱和度，漆膜指数是析出后的结果，将事后确认变为事前预测。

VALUE

更早 · 更全 · 在线 · 更经济

提前6-8周预警，融合多维健康信息，兼顾 <100 pS/m 静电安全，一表多用。

FUTURE

剩余清漆寿命预测

pS/m + 介电常数 + 温度多参数AI，构建 Remaining Varnish Life 模型，实现预测性维护。

三合一探头回油管安装 → 新油基线 ×3 平均 → +100% 预警 / +200% 行动 → MPC+RULER验证 → 静电吸附/树脂净化

让每一滴油都会“说话”

致谢 / Q&A

纳入 ISO 4406 & TAN 之外的第三维度 · 写入点检标准 · 共享后续实验数据