

油品传感器的在线监测革命

水分 / 介电常数 / 电导率 / 磨损颗粒 / 介电损耗 —— 五维透视润滑油、液压油、变压器油、汽轮机油

Online Oil Monitoring　Predictive Maintenance　Industry 4.0 • 多油品 • 多参数 • 多行业

目录 — 从为什么到怎么做

01 **为什么需要在线油品监测** 痛点
从定期换油到状态维修，80%液压故障与油液相关

02 **五大核心监测参数详解** 参数
水分 / 介电常数 / 电导率 / 磨损颗粒 / 介电损耗

03 **四大油品类型与监测重点** 矩阵
润滑油、液压油、变压器油、汽轮机油矩阵

04 **传感器技术原理与选型** 技术
电容、微电流、电感、光学、tanδ技术路线

05 **行业应用全景** 全景
工程机械 / 钢铁冶金 / 空压机 / 压铸机

06 **分行业场景深度解析** 场景
4个典型场景与安装方案、阈值与收益

07 **欧美标杆应用案例** 案例
Caterpillar / Bosch Rexroth / TenneT / ArcelorMittal

08 **市场前景与实施路径** 落地
ROI、2030预测、选型安装与行动三步走

从定期换油到预测性维护

80%

液压系统故障与油液状态直接相关 — ISO研究

50%

变压器绝缘失效源于油质劣化与受潮

>¥200万

单次透平油漆膜导致非计划停机损失

传统离线化验的窗口期丢失

取样 → 寄送 → 化验 → 报告，滞后48h-2周。氧化拐点、进水事件、ESD静电放电往往发生在两次化验之间，错过最佳干预窗口。

TRADITIONAL • 痛点



事后与定时

按时间换油，过度保养 30-70% 浪费；突发故障仍频发。滤芯旁通、阀卡涩无预警。

TREND • 转型



在线传感器 + 边缘计算

回油/压力管路连续监测 5 维参数，本地阈值 + 趋势 + 变化率，CAN / OPC UA 接入控制系统。

VALUE • 价值



预测性维护 CBM

换油周期延长 30-70%，非计划停机降低 40%，能效提升 5-8%，实现碳中和下的油寿命最大化。

五大核心参数 — 油品的生命体征

一个传感器看不清全貌，五维融合才能区分进水、氧化、磨损、静电与绝缘失效

1. 水分 Water

RH% / ppm

＞200 ppm加速氧化，＞500 ppm导致氢脆与润滑膜破裂。电容式/阻抗谱原理，ASTM D6304关联。

新油 <100 ppm • 报警 >300 ppm • 危险 >500 ppm

液压油首要　齿轮油首要

2. 介电常数

Permittivity

反映氧化、添加剂消耗、极性污染。新油2.1-2.4，老化>3.5，趋势变化>15%提示换油。

Δ >10% 关注 • Δ >15% 预警

氧化指纹　透平油核心

3. 电导率

Conductivity pS/m

可溶漆膜前驱物的指纹。Group II/III基础油 <50 pS/m 存在静电风险，＞800 预示严重氧化。

静电: <50 pS/m 危险 • 正常 50-500 • 氧化 >800

漆膜预警　ESD核心

4. 磨损颗粒浓度 Wear Debris

ISO 4406 / NAS

感应式区分铁磁 >40μm / 非铁磁 >150μm，光学激光遮挡法计数。趋势突变比绝对值更重要，可提前2-4周发现轴承剥落。

液压伺服阀间隙 <2μm — ISO 4406 目标 18/16/13

液压油首要　工程机械必配　钢铁连轧必配

5. 介电损耗 tanδ

DDF

变压器油核心。90°C下 >0.5% 预示绝缘老化。需高电压探头，关联水分 + DGA溶解气体。

IEC 60247: <0.1% 健康 • >0.5% 预警

变压器专属

四大油品的监测重点矩阵 — 一张图看清首要参数

润滑油 · 齿轮/轴承

重点：水分 + 磨粒 + 介电常数。水分>200ppm加速氧化，铁磁颗粒>80μm预示微点蚀，介电常数>15%变化即老化。

液压油 · 伺服系统

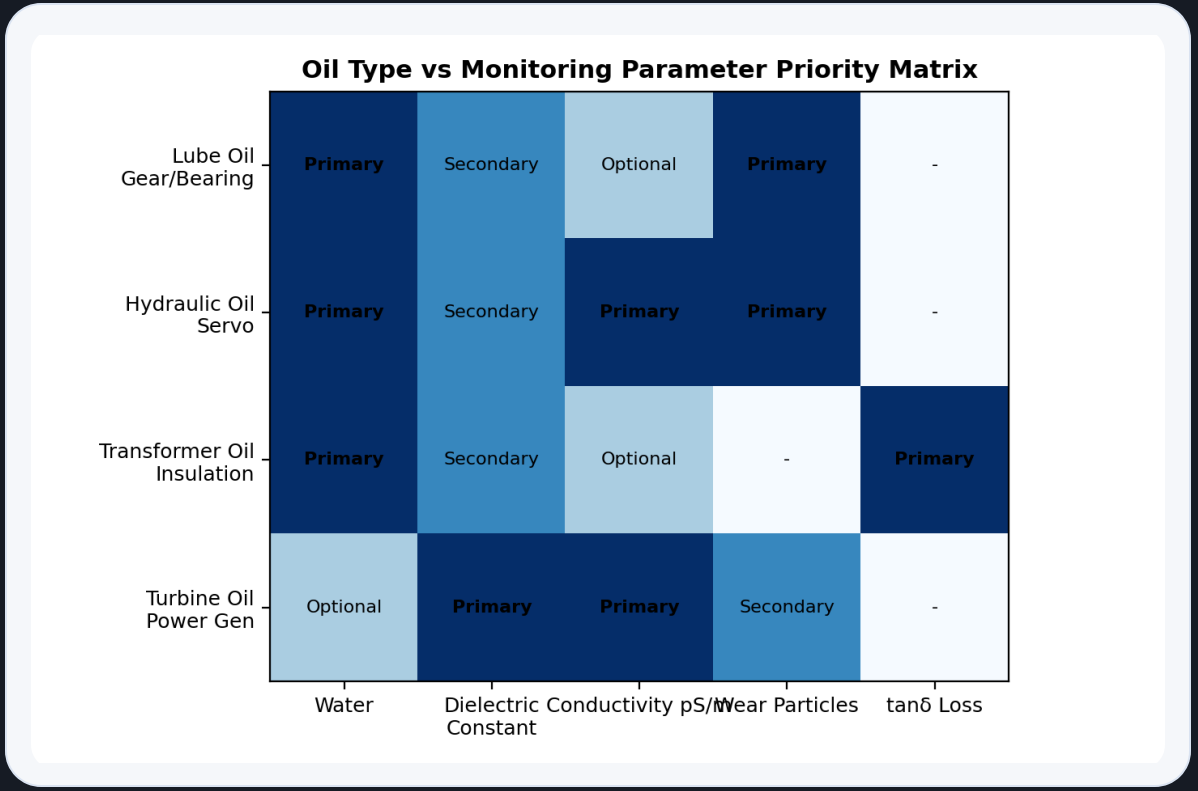
重点：颗粒 + 水分 + 电导率pS/m。阀间隙<2μm，NAS 8是红线；pS/m <50静电风险，>500氧化预警，阀卡涩核心。

变压器油 · 绝缘油

重点：介电损耗tanδ + 水分 + 介电常数 + DGA关联。tanδ >0.5%@90°C 绝缘老化，需与H2/CO协同。

汽轮机油 · 透平油

重点：电导率 + 介电常数 + 漆膜指数。Group II/III低电导+无锌＝高风险，MPC>25需投用静电吸附。



解读：新油介电常数2.1-2.4，老化>3.5；新油电导率5-15 pS/m，氧化后可飙至>300 pS/m，是漆膜前驱物的指纹，比TAN早6-8周。

传感器技术原理与主流产品

从单一水分到五维融合，欧美主流水准已实现在线多合一，精度接近实验室 ASTM 标准

电容 / 阻抗谱

水 + 介电常数

高频电场测相对介电，温度补偿折算 RH% / ppm。响应最稳，新油基线 2.1-2.4。

Parker Kittiwake | HYDAC CS1000 | Vaisala MMT330

微电流 pS/m

电导率 / 静电风险

pS/m 反映可溶漆膜前驱物。<50 静电风险，>800 氧化警报，双重价值。

Poseidon Q1100 | Tan Delta OQSx

电磁感应

铁磁 + 非铁磁磨粒

感应线圈计数 >40μm 铁磁颗粒，区分合金，寿命期内无耗材，自清洁。

Poseidon DM1100 | Yateks YMC

光学激光遮挡

ISO 4406 / NAS 颗粒度

激光遮挡法 4μ/6μ/14μ三通道，在线输出油液清洁度，伺服阀卡涩克星。

Argo-Hytos OPCom | HYDAC CS1000

tanδ / DDF 高频

变压器油绝缘核心

90℃ tanδ >0.5% 预警绝缘老化，需与水分+DGA联动，IEC 60422推荐。

Megger Vaisala | ABB Trafo

多合一 4-IN-1

水分+粘度+介电+颗粒

OQSx-G2 芯片化融合，一口安装输出健康指纹，风电/军舰标配。

Tan Delta OQSx-G2 | HYDAC FluidMonitoring

安装：回油侧 0.5-2m/s，避气泡，温补

标定：新油3次均值建基线，半年离线比对

接口：CAN / 4-20mA / OPC UA / MQTT 上云 • 自清洁光学窗

行业应用全景图 — 粉尘·高温·高可靠

同一套五参数传感器平台，适配6类典型工况：监测重点从颗粒/水分到电导率/介电损耗动态切换，ROI最高在偏远与高停机成本场景



工程机械 / 矿山

颗粒+水分双控，-30至50°C户外重载

钢铁 / 冶金

热轧AGC液压站 >300bar，伺服阀间隙<2μm，氧化+静电导致漆膜阀卡涩。

颗粒 Primary　电导率 Primary

空压机站

Atlas Copco / Kaeser螺杆机，水分乳化导致排气高温，介电常数趋势定换油。

水分 >300ppm报警　介电常数 +15%

压铸机

力劲等高温高速压射，油温>80°C氧化快，产线节拍敏感，阀磨损导致飞边。

介电常数 趋势　磨粒 >ISO 18/16/13

风电 / 水电 / 火电

齿轮箱润滑+透平油，偏远运维成本极高，在线监测ROI最高，预防微点蚀。

电导率 8→85预警　MPC联动

变压器 / 电网

大型电力变压器，荷兰TenneT / 北欧ABB案例，tanδ @90°C >0.5%预示绝缘老化。

tanδ Primary　水分+介电常数



场景1 — 工程机械与矿山

> 挖掘机 / 装载机 / 矿卡液压系统 230-350Bar，粉尘侵入 ISO 4406 18/16/13 恶化快，冷凝水+滤芯旁通风险高

SCENARIO

典型工况

主泵、动臂油缸、行走马达，高冲击+振动，户外作业温差大，油温频繁冲击 90°C+

CHALLENGE

核心挑战

颗粒侵入速度 3倍于工厂环境，水分 >200ppm 乳化，伺服阀卡涩导致动作迟滞、油缸爬行

SOLUTION • 收益

Argo-Hytos LubMon + OPCom

回油管路串联颗粒+水分传感器，NAS 8级报警。德国 Liebherr 案例：故障↓35%，换油周期 2000h→3500h

-35%	+75%	CAN
液压故障	换油周期	整车联动

场景2 — 钢铁冶金与重工业

热轧机 AGC >300bar | 伺服阀间隙 <2μm | pS/m 核心

连铸连轧液压站 24/7 高温高水，Group II 无锌液压油电导率 <30 pS/m，过滤即产生静电放电 ESD，氧化物聚集成漆膜。

CHALLENGE **氧化 + 静电 → 漆膜 → 阀卡涩**

板型缺陷、厚度超差，单次非停 50万€。传统 TAN/粘度无变化，**仅 pS/m 从 12→340 提前 3周**预警。

SOLUTION **Parker + HYDAC + e-protect 防静电滤芯**

HPU 回油：CS1000 颗粒 + 电导率 + 水分。逻辑：pS/m <500 时自动投用离子树脂，MPC >25 联动抛光过滤。

-70%	ArcelorMittal	<500
伺服阀更换	德国/美国	pS/m 自动治理



在线 HPU 监测单元
DIEL: 3.12 | WATER: 42ppm
STATUS: 静电风险监控中

ESD

场景3 — 空压机与压铸机 高频氧化的能效战场

ATLAS COPCO / KAESER · 螺杆空压站

油气分离器前后的连续呼吸监测

油温 + 水分 + 介电常数 | 趋势定换油

1. **监测点：**油分前后、回油管路，流速 0.8-1.5 m/s，避开泡沫段，温度补偿至 40°C基准
2. **阈值：水分 >300 ppm 报警，水活性 >0.4；介电常数 Δ>10% 关注，Δ>15% 立即取样化验**
3. **失效：**水分乳化导致排气温度 ↑8-12°C，氧化加速，机头结焦

3-5%	48h → 0	+40%
能效提升 排气温度↓	离线延迟 实时报警	滤芯寿命

LK·力劲 · 高温高速压射

油温 >80°C 快速氧化的换油依据

压射油缸 + 增压回路 | 模具粘铝预防

1. **场景：**压射频率 800-1200次/班，峰值 300bar，油温长期 85-95°C，传统定时换油浪费严重
2. **方案：**HYDAC CS1000 水分 + 介电常数趋势 + 光学颗粒 ISO 4406，回油侧加电导率 pS/m 预防漆膜
3. **联动：**MPC >20 投用精滤+e-protect 防静电滤芯，阀芯磨损 ↓70%

+50%	-60%	OPC UA
液压油寿命 2000h → 3000h	模具粘铝 非计划停	压铸MES 数据上云

• 共性逻辑： 两大场景都不靠粘度判断，靠 **水分的瞬态 + 介电常数的斜率 + pS/m的拐点** 三重确认，比 TAN 早 6-8周发现氧化。



DGA: H2/CH4/CO联动

tanδ + 水分 IEC 60422

OPC UA 上云

场景4 — 变压器与汽轮机

TRANSFORMER • 电网 Vaisala MMT330 + tanδ

大型电力变压器绝缘守护

监测点：油枕回流、散热器前，水分 0-100ppm 精度 ±2ppm，tanδ @90°C

荷兰 TenneT 案例：受潮早期预警，提前 11 周发现密封失效，避免 10M€ 击穿损失，欧美电网现标配 DGA + tanδ 在线。

<0.1%	0.5%	11周
健康 tanδ	预警阈值	提前期

TURBINE • 透平油 Poseidon Q1100 • MPC

GE / 西门子燃机透平油漆膜防控

Group II/III 低电导+无锌=高风险：pS/m 8→85 时触发静电吸附，联动 MPC ΔE >25

欧美电厂普遍 SOP：pS/m 连续监测 <500 自动投离子树脂，降低伺服卡涩 70%。

8→85	MPC 25	e-protect
pS/m 跃升	介入线	防静电滤芯

共性：从单参数报警 → 趋势+变化率+多参数融合 → AI RUL 预测。100%大型变压器 2030 年将标配在线。

欧美标杆应用案例汇总

从单参数报警到多参数融合+AI寿命预测，欧美已形成液压4.0与电网智能运维标准配置

🇺🇸 美国 Caterpillar / Parker

工程机械全系标配HYDAC颗粒传感器 — D11推土机主泵回油管OPCom实时NAS，滤芯旁通前30min预警；美军舰液压系统Parker Kittiwake水+介电常数监测，避免海水冷凝误动作。

NAS 8 报警 | 非计划停机 -40%

🇩🇪 德国 Bosch Rexroth + Argo-Hytos

液压4.0标配油液在线 — 热轧AGC 300Bar伺服站，颗粒+ pS/m联动e-protect防静电滤芯；当pS/m <500自动投用离子树脂，解决Group III低电导漆膜。

pS/m 联动控制 | 伺服阀更换 -70%

🇬🇧 英国 Tan Delta Systems

皇家海军+海上风电 — OQSx-G2 四合一（水分+粘度+介电+颗粒）芯片化，AI建立新油指纹基线，英国海上风电场水分预测准确率>95%，运维船次减少一半。

OQSx-G2 4-in-1 | 水分预测 95%+

🇳🇱🇸🇪 北欧电网 ABB / TenneT

变压器油tanδ在线成IEC 60422推荐 — 荷兰国家电网TenneT 380kV主变 Vaisala MMT330水分+tanδ在线，提前6周发现套管受潮，避免€10M级击穿损失。

tanδ @90°C >0.5% | 避免10M€损失

共性趋势： 单参数 → 多参数融合（Water + Permittivity + pS/m + Particle → 氧化+磨损判据） → RUL剩余寿命预测；平台：HYDAC FluidMonitoring / Parker AssetHUB via OPC UA/MQTT上云。

多参数融合与AI诊断 — 从数据到决策



五维融合逻辑： 单个参数波动易误报，AI油液健康中心同时比对 5 路趋势与变化率，建立新油指纹基线，自动识别失效模式。

融合判据模型

Water↑ + Permittivity↑ = **进水/冷凝** • Conductivity↑ + Permittivity↑ + Particle→ = **氧化+磨损** • tanδ↑ + Water↑ = **绝缘失效高风险**

pS/m Δ>50% + MPC>25 → 投用离子树脂 / 静电吸附

算法 – 阈值+趋势+自学习

三层：绝对阈值报警 → 7/30日斜率趋势 → 机器学习比对新油指纹。Group II/III 低电导油自学习基线 8-15 pS/m，偏差>3σ即预警，比TAN早6-8周。

- Remaining Useful Life
- 油品指纹基线
- 变化率 d(pS/m)/dt

平台与三色仪表盘

HYDAC FluidMonitoring + Parker Kittiwake AssetHUB，OPC UA / MQTT 上云，接入 SCADA / CMMS。

GREEN	YELLOW	RED
健康 <15	潜势 15-25	干预 >25 MPC

选型与安装最佳实践 — 1次装对，5年省心

1 安装位置 — 回油侧为王

- **优先回油管路** > 压力管，流速 **0.5-2 m/s**，避开气泡与死角，传感器 45° 斜装自排气
- 传感器前 **10D 直管段**，远离泵出口脉动，油温与主回路温差 <5°C 做温度补偿至 40°C基准
- **电气：**CAN / 4-20mA 接主控，屏蔽双绞线，ESD 接地 <4Ω，避免变频器干扰

2 选型对照 — 按工况对号入座

液压油 VG46 伺服	齿轮油 VG320 风电
OPCom + pS/m 标配	**磨粒感应 + 水分**
透平油 VG32 Group II	变压器油 110kV+
pS/m + MPC 强制	**tanδ + MMT330 水分**

粘度 >200cSt 预热旁路，压力 >35MPa 用高压适配块，温度 >120°C 选不锈钢探头。

3 标定 — 新油建基线

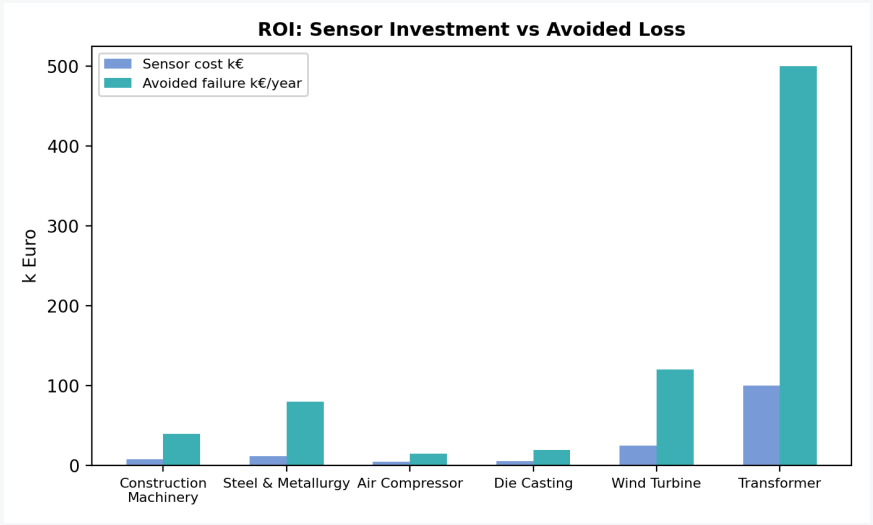
- 新油注入后 **循环24h**，连续取3次均值建 **Oil Fingerprint** 基线：Permittivity / pS/m / ISO
- 每 **6个月离线比对1次**：实验室 Karl Fischer + MPC + 光谱，修正在线漂移 <5%
- 基线入库：AssetHUB / FluidMonitoring 平台存档，用于 RUL 寿命预测

新油基线 **Day0** → 3次均值 **Day1** → 离线比对 **6M** → 自学习 **AI阈值**

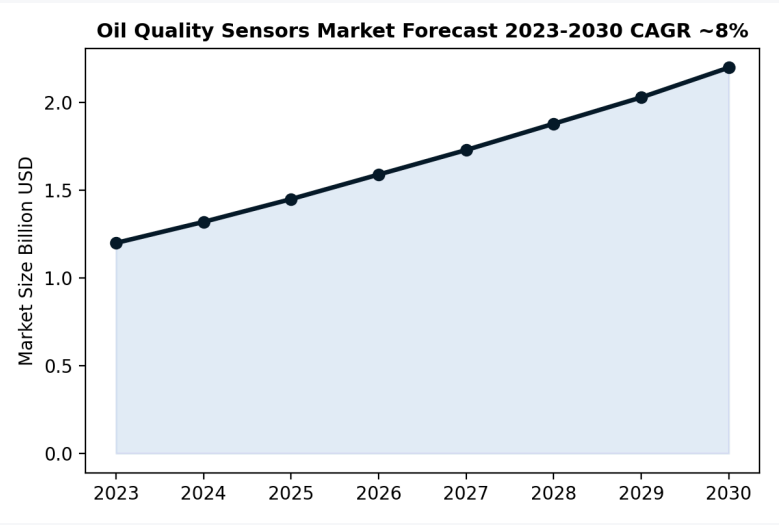
4 维护 — 无耗材长效

- **自清洁：**电磁感应磨粒传感器免维护，光学 OPCom 自动吹扫窗口，周期 30 天
- **校验：**pS/m 每年空气零点校准，电容式水传感器无需重标定
- **误报规避：**启机低油温、换油冲击期设 2h 冻结窗口，避免瞬态误报警

经济性分析与市场前景 — 6个月回本的隐形价值



传感器成本 2k-8k€ vs 单次非停损失 50k-500k€ — 变压器 > 风电齿轮箱 > 钢铁冶金 > 工程机械，ROI最陡峭在高停机成本场景



Oil Quality Sensors Market 2023-2030 CAGR ~8%，驱动：Industry 4.0 + 碳中和延长油寿命 + 电网可靠性

<6月
平均回报周期
避免1次即覆盖

30-70%
换油周期延长
油耗与碳排放↓

-40%
非计划停机
能效 +5-8%

2030预测 – 标配化拐点

70% 高端液压设备、100% 大型变压器将标配在线油液传感器，从选配变强制

挑战与机会 – 国产化 + 标准化

机遇：多参数芯片化、无线无源、国产替代；挑战：粘度/温度补偿模型统一、OPC UA/MQTT 数据互通

投资逻辑： 传感器不是成本，是**保险**。2k€的探头，赌 50k€的停机。碳中和下，油寿命每延长1年 = 减少 40% 危废油处理。

看不见的油，
看得见的风险 — 传感器让油品会说话

水 Water	颗粒 Particle	电导率 pS/m	介电常数 ε	tanδ 损耗
→ 腐蚀 氢脆·乳化	→ 磨损 阀卡涩·点蚀	→ 漆膜 静电·沉积	→ 氧化 添加剂消耗	→ 击穿 绝缘老化

1 **选 1-2 台关键设备试点**
液压站/主变/齿轮箱，回油侧 0.5-2m/s，CAN / OPC UA 接入

2 **建基线跑 3 个月**
新油3次均值建指纹，持续比对离线 ASTM D7843 / D6304

3 **接入 SCADA / CMMS**
红黄绿三级预警，pS/m <500 自动投树脂，MPC>25 抛光过滤

- 未来：多参数芯片化
- 无线无源供电
- 数字孪生油液 RUL 预测
- Online Oil Monitoring | Predictive Maintenance