

Application and Development of External Instrument in Petrochemical Industry

Ruiting Bai Huijuan Lv

Inner Mongolia Tongwei Silicon Energy Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract

With the petrochemical industry's heightened demands for production safety and environmental protection, external-mounted instruments have emerged as a critical solution for tank level and temperature monitoring, thanks to their non-contact measurement, installation without drilling, and leak-proof advantages. Through technical applications and case studies, this paper elucidates their working principles, technical features, and practical outcomes, with a focus on innovative implementations in crude oil storage tanks, high-temperature vaporizers, and Safety Instrumented Systems (SIS). It highlights their value in enhancing safety and reducing maintenance costs, while anticipating trends toward intelligent and high-precision technologies. Research demonstrates that external-mounted instruments, utilizing sonar ranging and frequency-modulated ultrasonic technologies, overcome the measurement challenges of traditional instruments in crystalline or highly corrosive media, as well as the difficulties of post-installation modifications requiring drilling. These advancements provide crucial support for industrial technological upgrades.

Keywords

petrochemical industry; external-mounted instruments; non-contact measurement; hole-free; technological innovation

外贴式仪表在石油化工行业的应用与发展

白瑞亭 吕慧娟

内蒙古通威硅能源有限公司, 中国·内蒙古 包头 014010

摘要

随着石油化工行业对安全生产、环保节能要求的提高, 外贴式仪表凭借非接触测量、免开孔安装、无泄漏风险等优势, 成为储罐液位、温度监测的关键技术。基于技术应用与案例研究, 梳理其工作原理、技术特点及应用效果, 重点分析在原油储罐、高温汽化器、SIS系统等场景的创新应用, 总结提升安全性、降低维护成本的价值, 展望智能化、高精度化趋势。研究显示, 外贴式仪表通过声呐测距、变频超声波等技术, 解决传统仪表在易结晶、强腐蚀性介质中的测量难点及后期改造开孔难题, 为行业技改升级提供关键支撑。

关键词

石油化工; 外贴式仪表; 非接触测量; 免开孔; 技术创新

1 引言

石油化工行业作为国家能源战略核心领域, 生产过程涉及原油、液化气等大量高危介质存储与传输。据中国石油和化学工业联合会数据, 2024年我国石化行业总产值达16.28万亿元, 涉危化品储存企业超3万家。传统仪表需开孔安装, 存在泄漏风险、维护困难等问题, 尤其在强腐蚀、高温高压工况下, 接触式仪表寿命短、故障率高, 直接威胁生产安全。

应急管理部报告显示, 仪表失效导致的重大事故占比较高, 液位测量装置故障是主因之一。外贴式仪表通过外部非接触测量, 实现“不动火、不清罐、不开孔”安装, 杜绝

泄漏隐患, 已广泛应用于球罐、卧罐等多种罐型, 并拓展至安全连锁、智能诊断等场景。本文结合技术发展、案例应用及行业数据, 系统阐述外贴式仪表的技术演进、应用实效与发展方向, 为行业技术选型与创新提供参考。

2 外贴式仪表的技术原理与分类

外贴式仪表的核心在于利用声波、超声波等物理信号在罐壁中的传播特性, 通过外部传感器检测介质状态。从技术发展历程来看, 外贴式测量技术经历了三个主要阶段, 声导波技术, 超声波共振技术, 以及现在的智能声呐技术。这种演进使得测量精度从最初的 $\pm 5\%$ 提升到目前的 $\pm 0.5\%$, 适用范围也从常温常压扩展到高温高压工况。

2.1 外贴式液位计

以声呐式外测液位计为代表, 采用微振动分析技术和声呐测距原理。通过校准探头实时补偿液体声速变化, 精度

【作者简介】白瑞亭(1988-), 男, 中国内蒙古包头人, 本科, 工程师, 从事化工仪表自动化研究。

达 $\pm 1\text{mm}$ ，基于时差法测量原理，利用容器不同高度的两个传感器测量声波传播时间差计算声速，将温度变化引起的测量误差控制在 0.1% 以内。采用数字信号处理 (DSP) 技术，通过小波变换和神经网络算法，有效过滤罐壁腐蚀、沉积物等干扰信号，在液面波动 30% 时仍保持测量稳定。

技术参数方面，测量范围 $0\text{-}35$ 米，工作温度 $-60^{\circ}\text{C}\sim+220^{\circ}\text{C}$ ，压力适用范围真空至 6.4MPa 。针对低温液化气体（如 LNG）测量，采用特殊设计低温探头，解决传统仪表在 -160°C 极低温环境下无法工作的问题^[1]。

2.2 外贴式液位开关

基于超声波壁内传播衰减原理，通过检测罐壁中超声能量变化判断液位状态。以西安定华 ELL-SA 系列为例，其创新点包括：

变频超声波技术：动态调节发射频率（ $50\text{kHz}\text{-}200\text{kHz}$ 自动寻优），消除温度漂移和气泡干扰，介质密度变化 $\pm 20\%$ 时测量稳定性仍保持 $\pm 2\text{mm}$ 以内。

多探头冗余设计：四探头阵列（如 SA-XE 型）采用 2×2 矩阵排列，通过空间分集和频率分集技术提升容错能力，单个探头失效仍可正常工作，可靠性达 SIL3 等级。

安装采用强磁吸附或专用胶粘剂固定，力矩控制在 $30\text{-}50\text{N}\cdot\text{m}$ ，适配碳钢、不锈钢、玻璃钢等材质罐体的专用安装套件，兼顾牢固性与罐壁保护。

2.3 外贴式温度变送器

采用热传导补偿算法，通过建立罐壁温度与介质温度之间的数学模型，结合环境温度、风速等参数，实现介质温度的精确推算，间接反映介质温度。采用二线制 $4\text{-}20\text{mA}$ 输出，适用 $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围，精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。其优势在于避免内衬腐蚀、结垢影响，尤其适合强腐蚀性介质。对于壁厚在 $10\text{-}50\text{mm}$ 范围内的容器，测量误差可控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内。

此外，外贴式超声波流量计目前在工业应用中也有广泛应用，技术原理类似，通过检测流体流动对声波信号的调制实现流量测量，在管道监测中逐步推广。这种流量计采用时差法或多普勒效应原理，特别适合腐蚀性介质和高压管道的流量监测^[2]。

3 外贴式仪表在石油化工行业的应用案例

外贴式仪表在石油化工领域的应用主要集中在储罐液位监测、安全连锁保护、极端工况适配三大场景。根据中国特种设备检测研究院的统计，截至 2025 年，全国在用的外贴式仪表数量已超过 15 万台，覆盖了全国 85% 以上化工企业。

3.1 储罐液位监测与安全管理

原油、液化气等储罐需连续监测液位以防冒顶或抽空。根据 API 2350 标准要求，各类石油储罐必须配备独立的液位监测装置。外贴式仪表凭借免开孔特性，成为技改首选：

球罐应用：某石化企业丙烯球罐采用 ELL-FI-CE 液位

计，替代传统雷达液位计解决介电常数波动导致的“失波”问题，安装于罐壁底部，通过校准探头补偿温度变化，精度长期保持 $\pm 1\text{mm}$ 。项目实施后年维护费用降低 65% ，避免非计划停车 2 次，直接经济效益达 320 万元。

浮顶罐优化：SA-XE 液位开关采用多通道校准技术，纵向布置传感器消除浮盘密封件干扰，实测信号差异达 400mV ，信噪比 $\geq 21\text{dB}$ 。舟山国家石油储备基地应用显示，误报率从 5.3% 降至 0.2% 以下，显著提升安全性。

我国战略石油储备基地已全面采用外贴式仪表监测系统，舟山基地安装 1280 台，实现 256 个储罐实时监控，仪表平均无故障时间达 15 万小时，远超传统仪表的 8 万小时^[3]。

3.2 安全仪表系统 (SIS) 中的关键作用

在 SIL 认证连锁系统中，外贴式液位开关作为冗余检测单元，显著提升可靠性，满足 IEC 61511 标准 SIL2 以上等级要求。

原油罐区 SIS 系统：某项目采用 1 台 SIL3 级外贴液位开关与雷达、电子远传液位计构成“三取二”逻辑，连锁关闭进料阀，故障诊断功能使系统响应时间 $< 500\text{ms}$ ，满足紧急停车要求。

高温汽化器连锁：多晶硅三氯氢硅汽化器（ 117°C ）应用中，外贴式液位开关通过高频超声波穿透沸腾介质，测量准确率 100% ，连续运行超 1 年无故障。

在剧毒介质（光气、氰化氢）储罐中，非接触特性消除泄漏风险，使重大危险源风险等级降低 1-2 级；在强腐蚀介质（氢氟酸）测量中，使用寿命达传统仪表 5 倍，维护成本降 80% 。

4 外贴式仪表的优势与经济效益分析

根据中国石油和化学工业联合会的调研数据，外贴式仪表在石油化工行业的应用已产生显著的经济和社会效益。以下从多个维度进行详细分析：

4.1 安全优势

非接触式安装杜绝开孔带来的泄漏点，特别适合有毒、易燃介质。统计数据显示，采用外贴式仪表后，储罐区泄漏事故发生率降低了 95% 以上。在液化天然气 (LNG) 储罐等极端低温场合，外贴式仪表完全避免了传统安装方式可能导致的保冷层破坏问题。从安全生命周期成本角度分析，外贴式仪表的应用使安全仪表的验证测试时间缩短了 70% 。传统的液位计需要定期进行校验，而外贴式仪表可以通过自诊断功能实现在线验证，大大降低了安全维护的人工成本和风险^[4]。

4.2 经济效益

安装成本降低 70% ：免清罐、不动火，大幅缩短工期。某液化气球罐改造中，外贴式安装仅需 4 小时，较传统法兰式的 3 天停机时间，单个储罐可避免直接经济损失 $150\text{-}200$ 万元。

维护成本节约：诊断功能减少人工巡检，年维护费用

从 800 元/台降至 200 元/台。某千万吨级炼化项目年维护成本降低超 300 万元。

停机损失避免：山东某氯碱厂应用后年避免非计划停车 2 次，单次节约 80 万元，10 台储罐改造后投资回收期不到 6 个月。

全生命周期成本分析显示，外贴式仪表寿命 15-20 年（传统仪表的 2-3 倍），综合安装、维护及停产损失，10 年总拥有成本比传统仪表低 50% 以上。

4.3 技术效益

精度提升：自校准技术使液位测量误差 $\leq 0.1\%$ 。现代外贴式仪表采用温度、压力多参数补偿算法，在 $-50^{\circ}\text{C} \sim +200^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内，精度指标保持稳定。

适应性广：已测试介质包括液氨、硫酸、原油等上百种，粘度范围覆盖至 $30\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。特别是在高粘度介质（如渣油、沥青）测量方面，外贴式仪表通过低频超声波技术，解决了传统仪表无法准确测量的难题。

从智能化程度来看，新一代外贴式仪表普遍支持工业互联网（IIoT）接口，可以通过 4G/5G 网络实现远程监控和预测性维护。某智能工厂应用案例显示，通过大数据分析，外贴式仪表的故障预警准确率达到 95%，实现了从预防性维护到预测性维护的转变。

5 挑战与发展趋势

尽管外贴式仪表在石化行业应用成效显著，但仍面临技术挑战与发展瓶颈。

5.1 当前挑战

根据行业专家访谈和市场调研数据，当前主要存在以下问题：一是信号干扰，罐壁锈蚀或厚度不均会吸收超声能量，导致测量误差增大至 3-5%，老旧储罐改造时尤为突出。二是极端工况极限，温度超过 220°C 需升级探头材料，高频振动下信号稳定性有待提升。三是标准化不足，安装规范与国家标准体系尚不完善，不同产品存在兼容性问题。从市场应用看，该仪表在新项目中占比较低，多用于改造，主要受初始投资较高和技术人才缺乏制约。

5.2 技术创新方向

技术创新主要体现在四个方向：一是智能化与 AI 深度融合，仪表集成 AI 算法以自动过滤干扰信号并实现自诊断，提升了测量精度与稳定性。二是多功能参数集成，设备从单一液位测量演进为同时监测温度、密度等多参数，简化了系统架构。三是无线物联与云平台协同，通过集成 5G/NB-IoT 技术实现数据实时上云，支持远程监控与预测性维护，降低了运维成本。四是非侵入式安装成为标配，无需开孔且不接触介质，彻底杜绝泄漏风险，安装维护更安全便捷。

5.3 行业趋势

从全球看，该技术正向标准化、智能化、集成化演进。欧美已将其列为化工厂安全改造推荐技术，IEC 正在推进国际标准制定。中国企业的竞争力也在提升，例如定华电子的

i-Tank 系统，实现了罐区远程监控并与外测仪表等设备无缝集成，其专利技术已纳入行业标准，应用于石化、军工等领域。未来，该技术可向数字孪生深化，通过三维建模与实时数据驱动实现预防性维护。

6 结论与建议

6.1 结论

外贴式仪表通过非接触测量技术，成功解决了石油化工行业高危介质的监测难题，在安全、经济、环保方面展现出显著价值。其核心优势在于：

本质安全：免开孔设计彻底消除泄漏风险，特别是在剧毒、易燃易爆介质监测方面具有不可替代的优势。

技改便利：不停产安装，大幅降低改造成本。安装时间短，投资回收期短。

技术成熟：声呐、超声波技术经千余案例验证，可靠性高。目前已达到 SIL3 安全等级，测量精度稳定在 $\pm 0.5\%$ 以内，使用寿命超过 15 年。

从行业发展来看，外贴式仪表正在从单一的过程参数的测量向多参数监测、智能化诊断方向发展。与物联网、大数据等新技术的深度融合，将进一步拓展其应用空间和价值空间。

6.2 建议

基于研究结果，提出以下建议：

企业应用层面：优先在 SIS 系统、高温腐蚀工况中推广应用，特别是在涉及重大危险源的场合，建立完善的外贴式仪表维护规程和培训体系，充分利用其预测性维护功能，降低全生命周期成本。

行业发展层面：加快国家标准体系建设，规范产品性能和要求，加强产学研合作，突破高温高压等极端工况技术瓶颈，推动传统仪表制造企业转型升级，提升产业竞争力。

政策支持层面：将外贴式仪表纳入安全技术改造推荐目录，设立专项扶持资金，鼓励中小企业应用新技术，加强国际交流合作，参与国际标准制定。

未来，随着材料科学、智能算法的进步，外贴式仪表将向更高精度、更广适应性方向发展。特别是在碳达峰、碳中和目标背景下，外贴式仪表在能源计量、碳排放监测等新领域将发挥更大作用，为石油化工行业智能化转型提供核心支撑。

参考文献

- [1] 中国石油和化学工业联合会. 2022年中国石油化工行业发展报告[R]. 北京, 2023.
- [2] API 2350, Overfill Protection for Storage Tanks in Petroleum Facilities[S].
- [3] 西安定华电子股份有限公司. ELL系列外贴式仪表技术手册[Z]. 2023.
- [4] 李桂香. 外贴式仪表在石化装置SIS系统中的应用研究[J]. 自动化仪表, 2023,44(2):1-6.