

# 从进口替代到市场引领：高端石油化工智能仪表国产化发展路径研究

殷小媚（大连市化工设计院有限公司，辽宁 大连 116033）

**摘要：**本文聚焦高端石油化工装备智能仪表国产化，分析国际主流产品高精度、高可靠性等技术特征与国内中低端成熟、高端滞后的发展现状，剖析技术深度、系统集成等核心差距。提出核心部件攻关、可靠性测试体系构建及行业标准与数字化生态建设路径，明确1-3年初步替代、3-5年广泛拓展、5-10年技术引领的分阶段目标，为国产智能仪表从进口替代到技术引领提供方案，助力提升技术自主权与市场竞争力。

**关键词：**高端石油化工装备；智能仪表；国产化；核心部件攻关

**中图分类号：**TE65      **文献标识码：**A      **文章编号：**1674-5167(2025)035-0036-03

## From Import Substitution to Market Leadership: Research on the Domestic Development Path of High-End Petrochemical Intelligent Instruments

Yin Xiaomei (Dalian Chemical Design Institute Co., Ltd., Dalian Liaoning 116033, China)

**Abstract:** This paper focuses on the domestication of high-end petrochemical and oil equipment intelligent instruments. It analyzes the technical characteristics of high precision and high reliability in international mainstream products, as well as the development status of domestic mid-to-low-end maturity and high-end lag. The core gaps in technical depth and system integration are dissected. Solutions are proposed, including breakthroughs in key components, the establishment of a reliability testing system, and pathways for industry standards and digital ecosystem development. Phased objectives are defined—initial replacement within 1-3 years, extensive expansion within 3-5 years, and technological leadership within 5-10 years—to provide a roadmap for transitioning from import substitution to technological leadership in domestic intelligent instruments, thereby enhancing technological autonomy and market competitiveness.

**Keywords:** High-end petrochemical equipment; Intelligent instruments; Localization; Core component R&D

高端石油化工装备作为国家能源战略与化工产业升级的核心支撑，其运行稳定性与控制精度高度依赖智能仪表，此类仪表更是保障生产安全、提升能效的关键核心部件<sup>[1]</sup>。当前，国际主流智能仪表凭借高精度、高可靠性及深度数字化优势，垄断全球高端市场，而国内产品虽在中低端领域成熟，却因核心部件依赖进口、复杂工况适应性不足、系统集成能力薄弱等问题，在高端装备领域长期受制于人，严重威胁产业链供应链安全<sup>[2]</sup>。随着石油化工产业向大型化、精细化升级，对高端智能仪表的需求持续攀升，推动其国产化已成为突破技术壁垒、保障产业安全的必然选择。基于此，本文聚焦高端石油化工装备智能仪表国产化，剖析国际技术特征与国内发展差距，探索核心技术突破路径与分阶段实施目标，旨在为国产智能仪表从进口替代迈向技术引领提供系统性方案，助力提升产业技术自主权与市场竞争力。

### 1 发展现状与核心差距

#### 1.1 国际主流产品技术特征

国外厂商长期占据高端石化智能仪表市场，其设计思路把超高精度、强可靠性和数字化列为第一梯队

指标，可在苛刻工况里同步完成实时监测与精准控制。传感器灵敏值保持高位，抗电磁干扰表现突出，压力偏差被压至  $\pm 0.05\%$ ，温度漂移不超过  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，流量误差低于  $\pm 0.2\%$ 。硬件端引入微机电工艺，把体积缩减与功能集成一次性完成，使整机能在高温、高压及强腐蚀场景持续运行。通信层主要采用 HART、FOUNDATION Fieldbus 和工业以太网，支持远程巡检、自动校准与故障自诊断，并可与分布式控制系统无缝衔接<sup>[3]</sup>。软件侧依托工业物联网和大数据技术，通过智能算法对运行参数开展滚动优化，进一步提升能效。相关产品须通过 SIL 3、ATEX 等安全评定，以此保证危险区域的稳定与安全，这一套技术组合巩固了其在高端细分领域的引领位置。

#### 1.2 国内产品发展现状

近年国产高端石化智能仪表的技术指标与市占率虽逐年抬高，却依然处于跟跑阶段。中低端场景的国产品牌已相对成熟，压力、温度、流量测量误差普遍落在  $\pm 0.2\%$  至  $\pm 0.5\%$  区间，足以应付常规工况。一旦进入流程复杂的装置，其高精度测量能力、动态响应速度及长周期可靠度仍显不足，个别型号在极端工

况下稳定度下降，维护周期随之缩短。数字化与智能化深度有限，现场通信仍以 HART 或国内行规为主，对 FOUNDATION Fieldbus 与工业以太网的适配度偏低，深层集成因此受阻。传感器与信号处理芯片等核心部件国产化比例不高，进口依赖度大，既抬升成本又削弱供应链安全。少量机型虽已取得 SIL 认证并通过国内防爆测试，但在国际高端市场的认可度仍有待提升。整体来看，国产与国际先进水平的差距正在收敛，高端竞争力却亟需进一步巩固。

### 1.3 主要差距与瓶颈剖析

国内高端石油化工智能仪表的技术深度依旧不足，动态响应、复杂工况适应以及精度保持三项指标在高于 500℃、高于 10MPa 和强腐蚀场合的测量误差偏大，现场失效率居高不下。系统集成度偏低导致产品难与 DCS、SIS 直接互通，自动化整体方案因此受限<sup>[4]</sup>。测试环节缺少覆盖极端条件的可靠性平台，长期性能数据缺口明显，国际采信度随之下降。产业链上游的高精度传感器、芯片与可靠性元件仍以进口为主，供应链韧性不足。国际标准制定话语权弱，认证门槛常把国产型号挡在门外，海外推广受阻；上述因素叠加，高端市场竞争力被大幅削弱。

## 2 智能仪表国产化发展的核心关键技术突破路径

### 2.1 核心部件与技术攻关路线

若要推进国产化，需先解决传感器量程与稳定性。压力窗口得覆盖 0.001–100MPa，温度区间需满足 -200–800℃，流量动态比不低于 100 : 1，同时把灵敏度、抗振及抗干扰指标一并拉高。信号链路的芯片要自行完成 24 位采样、1MHz 处理速度的 ADC、DSP、SoC 模块，否则复杂算法无法落地。材料端则须拿出耐 800℃ 以上、20MPa 以上并耐强腐蚀的新方案，让芯体在长周期运行中不失效<sup>[5]</sup>。通信部分应打通工业以太网、FOUNDATION Fieldbus 和无线协议，速率提到 1Gbps，现场电磁噪声再高也要保持帧完整。制造环节引入 MEMS，把器件做小、做集成，还要保证批量化一致性。极端工况下再叠加多物理量复合传感，使压力、温度、流量同步输出，为后续高精度监测提供原始数据。上述节点不是单线推进，而要整合行业资源，形成闭环研发体系，缺一环就会拖慢整机替代节奏。

### 2.2 产品可靠性设计与测试验证体系构建

国产高端智能仪表若想在市场中获得稳固地位，必须把可靠性作为首要评价指标，因此在设计初期就应覆盖全寿命周期。材料方面优先采用强度高且耐腐蚀的牌号，同时结合有限元分析提前消除结构中的薄弱环节，确保在 800℃、20MPa 以及强腐蚀叠加环境

下实现长期稳定运行。电路系统应选用高等级元器件，并扩大电磁兼容裕量，防止现场大功率设备对信号链路造成干扰<sup>[6]</sup>。关键功能模块需配置冗余机制，当面对温度剧烈变化、持续振动及高湿环境时，通过多级切换逐步分散风险。验证环节不能仅限于实验室，应在研发、制造和投运阶段均设置测试节点。首先在高精度实验平台上对传感器、芯片和通信部件进行高温高压盐雾组合应力测试；其次利用加速老化装置快速识别寿命拐点；同时在典型工艺段开展长期现场值守，覆盖多种压力、温度和介质条件。所有测试数据由在线监测平台统一采集，异常情况实时反馈至设计端，形成闭环迭代机制，使可靠性水平随批次提升，这一体系是国产仪表从可用走向可信的关键支撑。

### 2.3 行业标准与数字化生态建设

为了把高端石油化工智能仪表的国产化落到实处，行业规范与数字生态须同步推进。规范部分先把性能指标、测试方法、通信协议、可靠性与安全认证固定下来，压力允差限定在  $\pm 0.05\%$ ，温度允差限定在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，随后把自主工业以太网与 FOUNDATION Fieldbus 纳入同一文件，确保与 DCS 及 IIoT 对接无障碍；认证步骤直接对接 IEC、ISO、SIL，使境外认同不再构成门槛。生态部分则贯通研发、制造、运维全链：研发环节借助数字孪生完成设计与仿真，制造环节通过智能制造保持部件一致并可追溯，运维环节部署物联网远程诊断与预测维护平台，实现设备协同及实时数据采集；数据格式与通信架构一旦统一，企业间信息即可共享<sup>[7]</sup>。规范与生态双双健全，国产仪表的技术根基与市场空间方能同步稳固。

## 3 分阶段实施与产业化推进路径

### 3.1 近期目标（1–3 年）：替代与验证期

在后续 1–3 年的替代验证阶段，国内智能仪表的首要任务是在若干进口占比高的节点完成首批替换，并同步对关键机组做实测确认；研发方向聚焦石化常规工况，优先考虑稳定性，使整机性能稳定处于中端水平；压力通道示值误差需控制在  $\pm 0.1\%$  以内，温度通道示值误差不得高于  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，流量通道量程比最低维持 50 : 1；材料仅需满足低于 500℃、低于 10MPa 及中等腐蚀即可，结构设计上应重点延长抗振寿命并保障运行可靠度<sup>[8–9]</sup>。

构建覆盖实验室、制造与现场三阶段的验证框架。先在实验室内搭建高温、振动、湿热、腐蚀四类模拟条件，对传感器及信号处理芯片开展长期稳定与抗干扰考核；其次把一致性检验嵌入批量制造流程，通过工艺节点检查保障出厂指标离散度受控；随后把装置安放到炼油或乙烯等典型工段，采集接口兼容、数据

连续及长期可靠信息，运行记录经回归分析后送回设计环节，用于下次优化，借此夯实国产智能仪表向外推广的技术底座。

### 3.2 中期目标（3-5年）：拓展与完善期

未来3至5年，国产智能仪表须完成从可用到好用的跨越，使用场景要向更苛刻的装置区延伸，同时补齐技术链条缺口。攻关方向首先放在高温（>500℃）、高压（>10MPa）、强腐蚀及多变量耦合位置，要求设备长期运行不漂移；压力测量允许偏差锁定 $\pm 0.05\%$ ，温度示值波动保持在 $\pm 0.1\text{℃}$ 以内，流量动态范围须扩展到100:1以上<sup>[10]</sup>。材料层面需推出新牌号合金与复合体系，耐热、抗压、耐化学侵蚀指标同步提高，以支撑仪表在极端工况下的寿命预期。通信端必须兼容工业以太网、FOUNDATION Fieldbus及无线方案，借此加快数据上传速率，并强化系统互操作与远程诊断功能。

制造环节先引入智能制造工具，把质量管控流程拆解为参数采集、实时比对与闭环修正三步，使核心部件的工艺离散度逐批次缩小，同步放大产能，性能波动被压到最低。测试验证随后把台架试验从稳态推向瞬态，把温差阶跃、压力脉冲与腐蚀介质同时加载，记录失效临界点，再把这些全工况数据归入多维数据库，用统计回归反向校准材料选点与结构尺寸。国内标准缺口同步填补，把复杂工况指标写进行业规范，推动认证测试与国际条款逐项对齐。研发、制造与验证三线并行，把稳定度与适应性先做成底线，再让后续升级有牢靠底座。

### 3.3 远期目标（5-10年）：引领与创新期

未来5到10年，国产高端石化智能仪表须完成由跟随到领跑的切换，核心任务是把握技术主导权握在手里。研发主线不再满足于补齐指标，而要瞄准复杂流程中的多变量同步检测、快速动态追踪和自适应调节，据此推出可长期在极端工况运行的下一代产品。压力示值偏差应压到 $\pm 0.02\%$ ，温度示值误差需控到 $\pm 0.05\text{℃}$ ，流量动态跨度应扩至200:1。同时，应打通多物理量复合传感路线，让压力、温度、流量及成分在同一单元内完成实时采集。材料端需同步提供能耐1000℃以上高温、承受50MPa以上高压并抵御多元介质腐蚀的解决方案，并改进其成形工艺与现场匹配度，从而支撑整套系统在国际市场建立持续竞争优势。

通信单元须融入工业物联网框架，完成全域互联并具备边缘运算功能，速率不低于10Gbps且时延更低，以此强化现场数据协同。制造环节应转向全面智能，搭建高自动柔性产线，在需求多元条件下维持高端品

批量产出。测试与验证平台需覆盖超高温、高压及复杂介质工况，开展全寿命性能评价，同时引入数字孪生虚拟试验手段，把验证效率与精度同步提升。标准工作要推动我国主导国际规则制定，扩大技术话语权，并配套面向全球的认证体系与服务网络。远期规划是建立完整自主创新体系，使国产智能仪表在技术、标准、市场三方面实现引领，最终汇聚成具国际竞争力的高端产业集群。

## 4 结语

本文通过梳理高端石油化工装备智能仪表国际技术特征与国内发展现状，精准识别出技术、系统集成及产业链层面的核心瓶颈，提出的核心部件技术攻关、可靠性设计与测试验证体系构建及行业标准与数字化生态建设路径，结合分阶段实施目标，形成了覆盖技术研发、产业推进的国产化系统性方案。该方案可有效助力国产智能仪表提升技术自主权与市场竞争力，推动其从进口替代逐步迈向技术引领。未来可进一步围绕智能仪表与工业互联网的深度融合应用展开研究，探索更高效的协同运行模式。

### 参考文献：

- [1] 佚名. 智能识别驱动下安全仪表系统国产化组态迁移实践[J]. 自动化博览, 2025, 42(07): 14-15.
- [2] 袁野, 靳小东. 输气场站智能仪表自动化技术应用措施及效果[J]. 石化技术, 2025, 32(05): 203-205.
- [3] 丁帅. 基于智能监测技术的流量计在线监控系统国产化创新研发[J]. 工业计量, 2025, 35(02): 113-115+121.
- [4] 凤建刚, 王发科, 陆凤春, 等. 基于智能识别的安全仪表系统国产化组态迁移技术的探讨[J]. 石油化工自动化, 2024, 60(05): 64-66+75.
- [5] 鲁卫华. 推动石化行业自动化仪表国产化分析[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(06): 18-21+46.
- [6] 陈鹏. 石油化工仪表与控制系统的应用[J]. 当代化工研究, 2025(18): 124-126.
- [7] 郭志晓, 侯慧颖. 石油化工类机械仪表自动化设备故障维护探讨[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(08): 35-37.
- [8] 刘玉环. 石油化工加热炉低氧燃烧控制系统的分析仪选型[J]. 石油化工设备技术, 2025, 46(05): 34-39+66+5.
- [9] 郭智强. 石油自控仪表施工质量控制措施分析[J]. 化工管理, 2025(11): 27-30.
- [10] 张青. 石油化工仪表自动化设备常见故障及智能检测技术探究[J]. 山东化工, 2024, 53(23): 203-205.

### 作者简介：

殷小媚（1998-），女，汉族，辽宁人，本科，助理工程师，研究方向：电气仪表。