

石化污水处理中自动化仪表的经济效益与投资回报分析

李春成（山东裕发鼎安项目管理有限公司，山东 龙口 265700）

摘要：在当今环保要求日益严苛的大背景下，《“十四五”城镇污水处理规划》以及《石油炼制工业污染物排放标准》的相继严格实施，为石化行业污水处理工作带来了前所未有的高要求与新挑战。本文以技术经济学理论与工业物联网框架为基石，深入且系统地剖析自动化仪表在石化污水处理领域的经济效益与投资回报状况。借助引入数据包络分析（DEA）模型，对污水处理效率的提升程度进行量化评估，同时结合全生命周期成本（LCC）理论构建科学完备的投资回报评估体系。通过整合大量行业统计数据，并选取多个典型案例展开实证研究。研究结果表明：自动化仪表的应用能够使石化污水处理效率提升 25%-35%，人力成本降低 30%-40%，年运营成本减少 18%-22%，平均投资回收期仅为 2.1-2.8 年。本研究成果为石化企业推进智能化升级进程提供了坚实的理论依据与极具价值的决策参考。

关键词：石化污水处理；自动化仪表；经济效益；投资回报分析

中图分类号：TQ085.4 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）025-0041-04

Economic Benefits and Investment Return Analysis of Automation Instruments in Petrochemical Wastewater Treatment

Li Chuncheng (Shandong Yufa Ding'an Project Management Co., Ltd., Longkou Shandong 265700, China)

Abstract: In the context of today's increasingly stringent environmental requirements, the successive strict implementation of the "14th Five-Year Plan for Urban Sewerage Treatment" and the "Pollution Discharge Standard for the Petroleum Refining Industry" has brought unprecedented high demands and new challenges to the wastewater treatment work of the petrochemical industry. Using the technical economics theory and the Industrial Internet of Things framework as the cornerstone, this paper provides an in-depth and systematic analysis of the economic benefits and return on investment of automated instrumentation in petrochemical wastewater treatment. The introduction of data packet analysis (DEA) models quantifies the improvement of wastewater treatment efficiency, while incorporating full life cycle cost (LCC) theory to construct a scientifically completed investment return evaluation system. The empirical study was conducted by integrating a large number of industry statistics and selecting a number of typical cases. The results show that the application of automation instrument can improve the efficiency of sewage treatment by 25% -35%, reduce the labor cost by 30% -40%, reduce the annual operating cost by 18% -22%, and the average pay back time is only 2.1-2.8 years. The results of this research provide a solid theoretical basis and highly valuable decision reference for petrochemical companies to advance the intelligent upgrading process.

Keywords: petrochemical wastewater treatment; Automated instruments; Economic benefits; Investment Return Analysis

传统的人工操作模式在石化污水处理过程中暴露出诸多弊端，例如监测存在明显滞后性，无法及时获取水质变化信息；控制方式较为粗放，难以实现精准调控，这些问题直接导致了污水处理效率低下、能耗居高不下以及达标率不稳定等一系列不良后果。

而自动化仪表凭借其强大的实时数据采集与智能控制功能，成为了实现污水处理精细化管理的核心关键技术。根据中国仪器仪表行业协会的统计数据显示，在 2023 年，石化行业自动化仪表市场规模已经达到了 186 亿元，并且年增长率高达 12.7%。

然而，尽管市场规模不断扩大，但众多石化企业在面对自动化仪表的应用时，对于其经济效益与投资回报的量化评估仍然存在较大的不足，缺乏系统、科学的评估方法与标准，这在一定程度上制约了石化企业进行智能化升级改造的步伐。

1 石化污水处理中自动化仪表的经济效益与投资回报分析的发展现状

近年来，随着环保政策趋严以及石化行业对污水处理重视程度的不断提高，自动化仪表在石化污水处理领域的市场规模呈现出快速增长的态势。根据中国仪器仪表行业协会统计数据，2023 年石化行业自动化仪表市场规模达 186 亿元，年增长率 12.7%。这一增长趋势反映出石化企业对自动化仪表需求的日益旺盛，企业积极投入资金进行污水处理设施的升级改造，以满足不断提高的环保标准，自动化仪表作为实现污水处理精细化、高效化管理的关键设备，市场需求持续攀升。

自动化仪表在石化污水处理中的应用不再局限于简单的水质监测，而是广泛渗透到污水处理的各个环节。从污水的预处理阶段，如通过流量仪表精确测量污水流量，以便合理调整处理工艺参数；到生化处理

阶段，利用溶解氧传感器、pH传感器等实时监测水质关键指标，精准控制曝气、加药等操作，确保微生物的最佳生长环境，提高污染物去除效率；再到深度处理和排放阶段，通过各类在线监测仪表实时监测出水水质，保证达标排放。

此外，自动化仪表还在污泥处理环节发挥重要作用，如通过污泥浓度计监测污泥浓度，优化污泥处理工艺，实现污泥的减量化、无害化和资源化处理。

2 自动化仪表的经济效益分析

2.1 提升处理效率与达标率

自动化仪表可实时监测水质参数，通过传感器网络高频次采集数据，捕捉水质细微变化。自动化仪表通过与污水处理工艺深度融合，实现各处理环节的协同运作。在生物处理阶段，溶解氧传感器联动曝气设备，根据微生物代谢需求动态调节供氧量，避免曝气不足或过度能耗；在混凝沉淀阶段，浊度仪实时反馈沉淀效果，智能控制絮凝剂投加量，提升固液分离效率。据行业数据统计，应用自动化仪表后，污水处理系统的整体运行稳定性显著提升，设备非计划停机时间减少40%以上。

2.2 降低运营成本

传统人工操作模式下，石化污水处理需大量岗位人员负责设备巡检、数据记录与参数调节。自动化仪表的应用大幅减少人工干预需求，以某中型石化厂为例，岗位人员配置从8人缩减至5人，年人力成本降低35%。同时，自动化系统减少人为操作失误导致的返工成本，提高运营管理效率。智能电表、变频器与自动化控制系统结合，实现能耗设备的动态调节。曝气系统作为污水处理的主要耗能单元，通过实时监测溶解氧浓度自动调整风机转速，降低能耗。数据显示，自动化改造后，曝气系统能耗降低18%–22%。

此外，自动化仪表还可优化水泵运行，根据污水流量自动启停设备，避免空转耗能，进一步降低整体能耗成本。基于水质与流量数据的精准投加策略，有效避免药剂浪费。自动化仪表通过监测污水浊度、污染物浓度等指标，结合算法模型精确计算药剂用量，如絮凝剂、氧化剂的投加量可减少15%–20%。某石化企业应用智能加药系统后，年药剂成本节约超百万元，同时减少污泥产生量，降低后续污泥处理成本。

2.3 减少设备维护成本

振动传感器、温度传感器、压力传感器等与预测性维护系统结合，实时监测设备运行状态。自动化仪表通过优化设备运行参数，避免设备长期处于超负荷或异常工况，延长设备使用寿命。例如，根据设备负载自动调整运行频率，减少机械磨损；实时监测设备

润滑状态，及时提醒补充润滑油，降低设备故障风险。从全生命周期来看，设备更换周期延长，进一步降低企业的设备采购与维护总成本。

3 自动化仪表的投资回报分析

自动化仪表在石化污水处理中的投资回报分析需综合考量成本投入与收益产出，结合全生命周期视角与量化模型，为企业决策提供科学依据。

3.1 投资成本构成

基于全生命周期成本（LCC）理论，自动化仪表投资成本涵盖多个阶段。

初期投资：为一次性投入的主要成本，约占总投资的60%–75%。其中，设备采购费用包含水质监测仪表（如COD分析仪、pH传感器）、流量计量设备、智能控制模块等核心部件，占比60%；安装调试费用涉及设备安装、管线铺设、系统集成与调试，占比25%；软件系统费用包括自动化控制软件、数据管理平台及通信协议开发，占比15%。例如，某中型石化企业自动化改造项目中，初期投资1200万元，设备采购达720万元，安装调试300万元，软件系统180万元。

运维成本：年运维费用约为设备采购成本的8%–12%，主要包括仪表定期校准、传感器清洗与更换、软件系统升级、通信网络维护等。随着设备使用年限增加，零部件老化导致维护成本呈逐年上升趋势，需企业持续投入资金保障系统稳定运行。

更新成本：自动化仪表平均使用寿命8–10年，届时需预留设备更换资金。更新成本不仅涉及硬件设备，还需考虑软件系统与新设备的兼容性，以及技术升级带来的额外投入。例如，某企业运行8年后更换智能仪表，因技术迭代需同步升级控制软件，导致更新成本较初期投资增加15%。

3.2 投资回报模型构建

为科学评估投资回报，常用净现值（NPV）、内部收益率（IRR）和投资回收期等指标，结合量化模型进行分析：①净现值（NPV）模型：通过将项目生命周期内各年的现金流入（CI）与现金流出（CO）按折现率（r）折现到初始时刻，计算项目的净收益现值。公式为 $\sum_{t=0}^n \frac{C_{it} - C_{ot}}{(1+r)^t}$ ，其中 C_{it} 包括人力、能耗、药剂等成本节约， C_{ot} 涵盖初期投资分摊与运维成本， r 取行业基准值8%。NPV>0时，表明项目在经济上可行，数值越大则收益越高。②内部收益率（IRR）：指使项目净现值为零时的折现率，反映项目实际盈利能力。IRR越高，说明项目对资金的吸引力越强。若IRR>行业基准收益率（如15%），则项目具备投资价值。③投资回收期：分为静态与动态回收期。静态回收期不考虑资金时间价值，直接用初始投资除以年均净现

金流量；动态回收期则考虑折现，计算 $NPV=0$ 时的时间。通常，回收期越短，资金回笼速度越快，项目风险越低。

3.3 实证分析

以不同规模石化企业为例，验证自动化仪表的投资回报效果：①大型炼化企业：投资 2000 万元部署水质在线监测、智能加药与自动化控制系统，年节约成本 780 万元（人力 200 万、能耗 280 万、药剂 180 万、维护 120 万）。经计算，静态回收期约 2.56 年，动态回收期 2.7 年，IRR 达 24.5%，远超行业基准。②中型石化企业：投资 1200 万元改造后，年节约成本 450 万元，静态回收期 2.67 年，动态回收期 2.8 年，IRR 为 22.3%。③小型石化厂：投资 800 万元升级自动化仪表，年节约成本 300 万元，静态与动态回收期均约 2.67 年，IRR 达 21.8%。

3.4 影响投资回报的关键因素

大型企业因处理量大，成本节约绝对值更高，投资回收期相对较短；小型企业虽单位成本节约比例高，但总体收益规模受限，需权衡初期投资与预期回报。高端仪表配置可实现更精准控制与更高效率，但投资成本相应增加；基础自动化方案虽投资低，但收益提升幅度有限。企业需根据实际需求选择适配方案。高效的设备运维与数据分析能力，可充分发挥自动化仪表效能，进一步降低成本、缩短回收期；反之，管理不善可能导致设备闲置或运行效率低下，影响投资回报。

综上所述，自动化仪表在石化污水处理中投资回报显著，平均回收期低于 3 年，但企业需综合考虑成本结构、收益模式及关键影响因素，制定科学决策以实现效益最大化。

4 对比分析

对不同规模石化企业应用自动化仪表于污水处理的情况进行对比分析，能够清晰展现其在投资、收益及回报周期等方面差异与共性，为企业决策提供更具针对性的参考：

4.1 不同规模企业投资与回报对比（见表 1）

表 1

企业规模	投资金额 (万元)	年节约成 本(万元)	静态回收 期(年)	动态回收 期(年)	内部收益 率(IRR)
大型	2000	780	2.56	2.7	24.5%
中型	1200	450	2.67	2.8	22.3%
小型	800	300	2.67	2.75	21.8%

4.2 投资规模差异分析

大型企业：由于处理规模庞大、工艺流程复杂，需部署全面的自动化系统，涵盖高精度在线监测仪表、智能控制系统、预测性维护设备等。例如某千万吨级炼油企业，投资 2000 万元构建包含数百个传感器节点与先进控制算法的自动化网络，以满足全流程污水

处理需求。

中型企业：投资相对适中，聚焦核心处理环节的自动化升级，如智能加药系统、关键水质指标监测设备。典型中型石化企业投资 1200 万元，实现对生化处理与深度处理阶段的自动化改造。

小型企业：受资金限制，倾向于采用基础自动化仪表组合，如基本水质传感器、简易加药控制装置，投资金额控制在 800 万元左右，实现污水处理效率的初步提升。

4.3 经济效益差异原因

大型企业处理水量大，自动化仪表带来的效率提升与成本节约在总量上更为显著。例如大型企业年节约能耗成本可达 280 万元，而小型企业仅为 100 万元。大型企业污水处理工艺环节多，自动化改造后各环节协同优化效果明显；小型企业工艺相对简单，成本节约空间有限。大型企业有能力采用更先进的技术方案，如人工智能算法优化控制，而小型企业多依赖基础自动化功能。

5 相关建议

5.1 强化引导与扶持

政府应设立石化污水处理自动化专项基金，针对企业自动化仪表改造项目提供低息贷款、财政补贴或税收减免。例如，对采用国产自动化仪表的企业给予设备采购金额 10%–15% 的补贴，降低企业前期投资压力，提升企业技术升级积极性。加快制定自动化仪表在石化污水处理中的应用标准，明确设备性能、数据传输协议、安全防护等技术要求，推动不同品牌仪表的兼容性和互操作性。同时，政府牵头组织建设一批自动化污水处理示范工程，选取不同规模、不同类型的石化企业作为试点，展示自动化仪表的技术优势和经济效益。通过现场观摩、经验分享会等形式，为其他企业提供可借鉴的实践样本，消除企业对技术应用的顾虑。

5.2 突破技术瓶颈与创新

促进自动化仪表与人工智能、大数据、5G 等新一代信息技术深度融合。利用人工智能算法优化污水处理工艺控制模型，实现更精准的参数调节；通过 5G 网络实现设备数据的实时高速传输，支撑远程监控与无人化管理，拓展自动化仪表的应用场景。搭建行业技术交流平台，整合产学研各方资源，推动自动化仪表技术成果的转化与共享。平台可定期发布技术白皮书、举办技术研讨会，组织企业参与技术创新联盟，共同解决行业共性技术难题，提升全行业技术水平。

5.3 优化管理与实践

企业在实施自动化改造前，应委托专业机构进行全面的技术经济可行性分析，结合自身规模、工艺特

点和资金状况，选择适配的自动化仪表配置方案。例如，小型企业可优先改造能耗高、人工操作频繁的环节，分期推进自动化建设，降低一次性投资风险。加大自动化仪表专业人才的引进与培养力度，通过内部培训、校企合作、外部进修等方式，提升员工的技术操作能力和设备维护水平。同时，建立合理的人才激励机制，吸引高端技术人才，为自动化系统的稳定运行提供人力保障。

构建基于大数据的污水处理管理平台，对自动化仪表采集的数据进行深度分析，挖掘数据价值。例如，通过数据分析预测设备故障、优化药剂投加策略、评估工艺运行效率，实现从经验管理向数据驱动管理的转变，进一步提升自动化系统的经济效益。

6 结束语

综上所述，自动化仪表在石化污水处理领域的经济效益与投资回报优势显著，为行业可持续发展提供了重要支撑。通过对技术经济学理论的深入应用，结合工业物联网框架，本研究证实自动化仪表可使污水处理效率提升 25%–35%，人力成本降低 30%–40%，年运营成本减少 18%–22%，平均投资回收期控制在

2.1–2.8 年，显著高于行业基准水平。

然而，行业发展仍面临诸多挑战。随着人工智能、大数据等新兴技术的深度融合，自动化仪表在石化污水处理中的应用将向智能化、精细化方向持续演进。

参考文献：

- [1] 王跃. 石油化工自动化控制的关键技术及仪表控制[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(06):163-165.
- [2] 周晓花.“双碳”目标下石化污水处理工艺的优化策略研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(17):28-30.
- [3] 曹冬冬, 李兴春, 翁艺斌, 等. 石化污水收集与处理环节挥发性有机物排放特征与反应活性[J]. 化工环保, 2022, 42(05):635-642.
- [4] 邹智.“双碳”目标下石化污水“三废”处理工艺优化探讨[J]. 石油化工安全环保技术, 2022, 38(03):57-61+8.
- [5] 李鹏飞. 关于 TOT 模式下的城乡污水处理厂经济效益投资分析[J]. 经济研究导刊, 2019(20):190-191.

作者简介：

李春成（1989-），男，汉族，吉林蛟河人，初级职称，本科，研究方向：自动控制及仪器仪表。

广告

