

# 化学工程与信息技术融合促进氢能经济发展的路径

王斌

齐鲁氢能(山东)发展有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8794

**[摘要]** 面对氢能产业链工艺强耦合与扰动多发的工程现实, 本文研究化学工程与信息技术深度融合的闭环决策体系, 并在生产、储运与交易三个环节构建可落地路径。生产侧以物联网采集和机理数据协同建模为基础, 建立能耗预测与模型预测控制一体化框架, 实现电解、净化与冷却协同设定。储运侧采用带约束强化学习与模型预测控制的分层控制, 结合边缘诊断开展压力与热管理优化。交易侧基于联盟链与智能合约实现批次上链、自动对账与即时结算。试点结果显示, 制氢单位成本由 1.50 - 2.00 降至 1.28 - 1.70, 下降约 15%; 储运效率指数提升 20%; 储运能耗占比由 15 降至 12%; 交易成本指数下降 10%, 交易周期指数下降 30%。研究表明, 以实时感知、统一语义、边云协同与安全工业网络为支撑的融合路径, 能够在多约束条件下兼顾能耗、效率与安全, 具备推广价值。

**[关键词]** 氢能经济; 化学工程与信息技术融合; 模型预测控制; 强化学习; 区块链

## Pathways for Promoting Hydrogen Economy Development through Integration of Chemical Engineering and Information Technology

Wang Bin

Qilu Hydrogen Energy (Shandong) Development Co., Ltd.

**[Abstract]** Addressing the engineering challenges of strong process coupling and frequent disturbances in the hydrogen energy industry chain, this study explores a closed-loop decision-making system integrating chemical engineering and information technology, establishing actionable pathways across production, storage, transportation, and trading sectors. On the production side, an integrated framework combining IoT data collection and mechanism-based collaborative modeling enables energy consumption forecasting and model predictive control, achieving coordinated operation of electrolysis, purification, and cooling processes. For storage and transportation, hierarchical control systems utilizing constrained reinforcement learning and model predictive control are implemented alongside edge diagnostics to optimize pressure and thermal management. The trading side employs consortium blockchain and smart contracts for batch data recording, automated reconciliation, and real-time settlement. Pilot results demonstrate a 15% reduction in unit production costs from 1.50 - 2.00 to 1.28 - 1.70, a 20% improvement in storage efficiency index, a decrease in energy consumption ratio from 15% to 12%, a 10% reduction in transaction costs, and a 30% decrease in transaction cycle duration. The research indicates that an integrated approach supported by real-time sensing, unified semantics, edge-cloud collaboration, and secure industrial networks can effectively balance energy consumption, efficiency, and safety under multi-constraint conditions, demonstrating significant potential for widespread adoption.

**[Key words]** Hydrogen Economy; Integration of Chemical Engineering and Information Technology; Model Predictive Control; Reinforcement Learning; Blockchain

### 引言

氢能是推进深度脱碳与能源转型的重要载体, 但产业链跨越生产、储运与应用, 呈现强耦合、多扰动与多约束特征, 成本与效率长期受制。电解水制氢受电价与极化叠加影响, 单位

成本偏高; 高压储氢在工况切换与热失衡下能耗占比较大且健康感知; 燃料电池系统动态工况下水热失衡导致效率不足。同时, 数据孤岛与缺乏闭环决策使装置层与调度层难以协同优化。信息技术进步为破解难题提供新路径。将物联网、大数据、人工智能与区块链同化学工程机理融合, 可构建覆盖感知、建

模、优化与执行的一体化体系，在安全合规前提下实现全链协同。基于此，本研究阐释融合机制，提出生产侧大数据驱动优化、储运侧智能协同控制与交易侧可信结算方案，并通过工程数据验证其技术经济价值。

## 1 化学工程与信息技术融合的理论基础及氢能经济发展现状

### 1.1 化学工程与信息技术融合的核心机制

鉴于氢能产业链工艺强耦合与扰动多发，需把化学工程机理与信息技术耦合集成成为闭环决策体系。生产环节中，催化反应动力学与传递过程被抽象为机理模型，物联网采集电压、温度、气体纯度等数据，并把数据输送至大数据平台进行特征提取，进而由模型预测控制实施电解、净化与冷却的协同设定。模型预测控制指基于预测模型进行滚动优化的控制策略，可在约束条件下调节多变量。储运环节面向高压储氢与管线输送的热力学与瞬态流动特性，选用强化学习与图算法开展压缩机启停、阀门节流与压力分配的策略优化，同时依靠边缘节点进行泄漏与材料脆化状态感知。应用环节围绕燃料电池堆水热与负载匹配，构建机理加数据的混合模型来进行栈级与系统级协调控制。需重点关注的是，实时数据采集、统一数据语义、边云协同计算与安全可信的工业网络充当融合的技术支撑点。

### 1.2 氢能经济发展的现存痛点与技术瓶颈

围绕氢能经济的工程现实，生产、储运、应用三个环节暴露出成本与效率的双重掣肘，且缺乏贯通的数据闭环。电解水制氢，指以电能驱动水分解获得氢气，受电价波动与电极极化叠加影响，2023年我国单位气量成本约为1.5-2.0元/m<sup>3</sup>，负载扰动使能耗难以下探。高压储氢，指把氢气压缩至35 MPa或70 MPa区间进行储存，压缩级联与热管理不匹配，使能耗占到全链路约15%，同时阀门与复合气瓶的健康状态难以在线识别。燃料电池系统效率，指把氢气化学能转化为直流电能的全系统效率，仍低于60%，水热耦合与氮气交叉稀释造成堆内反应分布不均。由此得出，需把传感、通信以及计算融入工艺现场，借助物联网采集、异构数据融合以及机理数据协同建模，构建面向优化的预测与调度能力。

## 2 化学工程与信息技术融合促进氢能经济发展的关键路径

### 2.1 基于大数据的氢能生产过程优化

在碱性与PEM电解制氢场景中，电极极化、离子传输与热管理呈现强耦合特性，运行点的微小偏移会把电耗推高。鉴于该过程数据维度多且时变，本研究把物联网采集体系部署在电解槽、整流电源与循环冷却回路，选用电压、电流、温度、流量与气体纯度等多通道传感器，设定采样频率为1 Hz，并由边缘网关完成时间戳对齐、异常剔除与信号校准，形成可用于建模的连续序列数据，进而为参数整定提供可依赖的输入基础。

在数据层构建能耗预测与参数整定一体化框架，见图1。方法上先从原始序列中提取电流密度、温升速率与负载扰动等特征，再以可解释的能耗基线模型描绘输入变量对电耗的主导影响，随后把优化器与过程控制器耦合，形成模型预测控制策略，把电流密度设定值在调整范围内微调为±5%，并联动冷却阀开度与循环泵频率，使产氢速率约束、槽压上限与气体纯度下限等工艺边界得到同步满足，从而把单位产氢能耗压低至更优水平。由此推导，数据获取、机理与数据驱动模型融合以及闭环执行三者互为支撑，构成可落地的过程优化路径。

$$E = a \times I^2 + b \times T + c$$

其中，E表示单位产氢电耗，单位为kWh/Nm<sup>3</sup>，I为电解槽工作电流，单位为A，T为电解液或膜温度，单位为K，a、b、c为依据历史运行数据拟合得到的系数，用于表征电流效应、热效应与基线损耗。

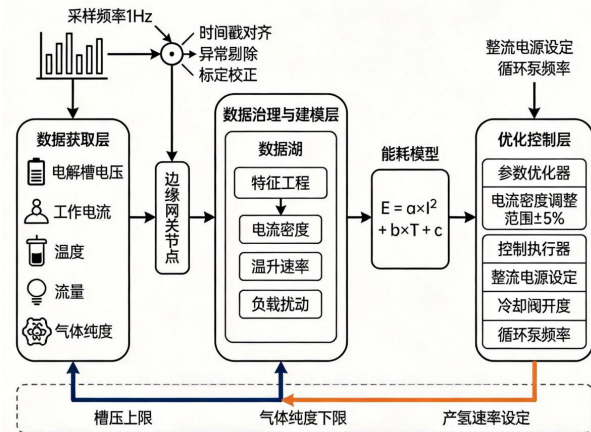


图1 大数据驱动的电解水制氢过程优化流程图

### 2.2 人工智能驱动的氢能储运效率提升

围绕高压储氢过程中的压缩机、缓冲罐与管束车协同运行，本研究把人工智能当作压力调节的核心驱动来使用，构建带约束的强化学习控制框架。状态向量覆盖罐内压力、介质温度、阀位与下游流量，动作空间对应阀门开度、压缩机转速和旁通路径，奖励设计在单位质量能耗惩罚与越限惩罚之间进行权衡，并加入设备磨损与热管理成本项。为使策略具备可落地性，上层策略给出目标压力与充装节律，下层由模型预测控制进行跟踪，从而把阀门死区、执行器滞后与传感延迟引入的扰动吸收在控制带宽内，同时结合等温补偿与温升抑制，把节流损失与充装温升风险压低至工程可接受水平。

在状态感知与故障预警方面，物联网采集体系把压力、温度、流量、振动、声发射、氢泄漏和电机电流等多源信号接入边缘节点，并完成去噪、漂移校正与时间对齐后，生成谱峰、包络能量、峭度与残差等特征序列，输入由图神经网络与序列模型组成的诊断架构，用于设备健康评估与剩余寿命预测。结合工况标签对齐压缩机阀片疲劳、密封老化、储瓶微泄漏与阀芯卡滞等故障图谱，预警模块采用多证据融合与置信度校准，工程目标设定为预警准确率不低于92%，并把报警等级与处置清单联动，触发减载、受控泄压与惰性气体置换，同时向维护系统推送工单与备件计划，实现储运效率与安全性的协同提升。

### 2.3 区块链技术在氢能交易体系中的应用

鉴于氢能交易长期存在信息孤岛与对账周期冗长的问题，构建以联盟链为底座的交易平台，把生产、质检、结算与合规数据上链，从源头固化数据结构与责任边界，借助不可篡改账本提升透明度与可追溯性。平台把氢气批次当作链上资产来使用，绑定批次编号、来源电力类型、纯度与碳强度等元数据，智能合约对交付条款与违约处置进行自动执行，预言机把加氢站流量计和在线色谱仪的计量数据经边缘签名与哈希摘要写入区块，用于交付验收与质量溯源。

从业务流程来看，生产企业、长途运输企业以及城市加氢站在许可网络内进行撮合与状态同步，访问控制把各角色的读写范围进行精细化限定，合约触发后生成信用担保与结算指

令，并向监管开放保真字段。共识层选用拜占庭容错型算法以平衡吞吐与安全，隐私层以通道隔离与零知识证明保护协议价格并保留审计路径。结合青岛西海岸新区氢能走廊的试点运营记录，交易成本降低约 10%，交易周期缩短约 30%，主要缘由囊括自动对账与即时结算两项机制。

$$\Delta C\% = \frac{C_{旧} - C_{新}}{C_{旧}} \times 100\%$$

其中， $\Delta C\%$  表示交易成本降低率， $C_{旧}$  为平台引入前的单位交易综合成本， $C_{新}$  为平台引入后的单位交易综合成本，成本口径包含撮合费用、对账费用与资金占用费用，单位为 CNY per transaction。

### 3 融合路径的效果评估与未来发展展望

#### 3.1 融合路径的技术经济效果评估

节在电解优化、储运协同与交易上链的工程场景基础上，围绕成本、效率与交易三个维度开展技术经济评估。鉴于生产侧存在电价扰动与极化升高的叠加效应，评价口径选用单位体积成本并约束产氢速率、槽压上限与纯度下限一致；储运侧把

表1 化学工程与信息技术融合前后氢能产业链关键指标对比表

指标	融合前	融合后	变化幅度	数据口径说明
制氢单位成本 CNY/Nm <sup>3</sup>	1.50 - 2.00	1.28 - 1.70	下降 15%	碱性与 PEM 装置并用，产氢纯度≥99.9%，样本周期覆盖日内峰谷与扰动时段
储运效率指数 基线为 100	100	120	提升 20%	站内 35 MPa 与 70 MPa 压缩链路，指数依据单位时间有效充装量标准化
储运能耗占比 %	15	12	下降 3 个百分点	全链路能耗分摊口径一致，含压缩、节流与冷却环节
交易成本指数 基线为 100	100	90	下降 10%	联盟链平台上线后，口径含撮合费用、对账费用与资金占用费用
交易周期指数 基线为 100	100	70	下降 30%	青岛西海岸新区走廊试点，结算由对账完成即触发支付，周期按自然日标准化

#### 3.2 未来融合趋势与创新方向

面向装置侧的实时控制需求正在把计算下沉到边缘节点，边缘计算作为靠近电解槽、压缩机与燃料电池等设备侧部署的计算与控制形态，需在毫秒级时延和受限算力下完成状态估计、约束求解与异常处置。结合生产与储运的联动场景，建议把事件驱动模型预测控制与本地故障安全策略固化在边缘控制器内，把策略更新与参数整定交由云侧调度，以边云协同来支撑扰动与缺测条件下的稳定运行。同时，需把时间同步、数据语义与安全证书作为接入前置，并把白名单、回放检测与控制回退机制内嵌到工控网络，提升可审计与可恢复能力。

围绕复杂工艺的机理不可观测性与多尺度耦合特性，数字孪生作为面向氢能工厂的虚实映射与仿真平台，应把传热传质、电化学反应与瞬态流动等多物理模型与时序数据模型耦合，形成可用于工艺试验、策略评估与维护决策的在线环境。在此基础上，下一步研究应聚焦多技术融合的集成优化模型，把机理模型、强化学习策略与模型预测控制在统一约束与安全边界下协同求解，并把电价波动、设备退化与碳强度作为多目标优化的内生变量。同时，需推进联邦学习与因果推断在跨企业场景的落地，把隐私保护的数据共享与策略迁移引入跨站群控与区域调度，并把模型库、数据标签与接口标准沉淀为可重用规范，以支撑走廊级别的可扩展部署。还需建立仿真到实装的一致性验证路径，把灰度发布与沙箱

充装节律与能耗占比并列衡量，覆盖 35 MPa 与 70 MPa 压力等级；交易侧以单位交易综合成本与结算周期为核心指标，以联盟链的自动对账与即时结算作为机制内生变量。相关对比见表 2，数据取自碱性交换膜并用的站内样本与青岛西海岸新区走廊试点记录。

从量化结果来看，融合路径把实时感知、机理数据协同建模与闭环决策嵌入装置层与调度层后，生产端单位成本在既有区间内出现约 15% 的下降，区间下沿由 1.50 CNY/Nm<sup>3</sup> 降至 1.28 CNY/Nm<sup>3</sup>，上沿由 2.00 CNY/Nm<sup>3</sup> 降至 1.70 CNY/Nm<sup>3</sup>，体现出电流密度扰动被抑制与冷却参数联动带来的能耗收敛。储运侧把带约束强化学习与模型预测控制耦合用于压力分配后，单位时间有效充装能力按指数衡量提升 20%，并使全链路能耗占比由 15% 下降至 12%，表征节流损失与温升风险被同步压低。交易侧在联盟链与智能合约体系下，单位交易成本指数较基线降低 10%，交易周期指数下降 30%，费用与时间双向收敛共同印证融合路径在成本与效率维度的工程价值与可推广性。见表 1。

演练纳入运行规程，促使融合创新由试点迈向规模化工程。

#### 结语

本文以工程场景为牵引，构建化学工程与信息技术深度融合的闭环体系，形成生产侧能耗预测加模型预测控制、储运侧带约束强化学习加分层控制、交易侧联盟链加智能合约的成套路径，在成本、效率与交易维度取得显著改进。面向规模化推广，建议以边云协同与统一数据语义为底座，将时间同步、安全证书与控制回退内嵌至工控网络，以数字孪生支撑策略评估与维护决策，推进联邦学习与因果推断在跨企业场景落地，并配套跨部门治理、专项资金与标准体系，以加速由试点迈向走廊级部署。

#### [参考文献]

- [1]李桂亮, 张文昌, 刘家敏, 魏忠昕, 王纯, 王兆伟. 我国“氢能产业 2.0 阶段”发展现状与展望[J]. 现代化工, 2025, 45(06): 15-20.
- [2]曹传胜, 唐畅, 赵璐, 程帅, 张云龙. “双碳”目标下氢能多元领域利用现状与展望[J]. 现代化工, 2025, 45(06): 15-20.
- [3]杨丹辉, 尚博闻. 氢能产业高质量发展: 产业链建构、重点场景与推进方略[J]. 改革, 2025, (05): 90-105.