

# 石化企业碳减排技术集成优化路径及其经济效益研究

杜康(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司石化总厂,山东东营257000)

**摘要:**随着全球碳中和目标的推进,石化企业面临着更高强度的减排压力。为实现可持续发展,提升碳减排技术的系统集成水平成为关键。本研究通过对石化行业减排技术实施现状进行系统梳理,识别出碳减排过程中存在的技术衔接不足、系统耦合弱、资源配置非最优等突出问题。在此基础上,构建具有适应性和可操作性的碳减排技术集成优化路径,围绕能源系统协同、流程深度融合、排放端高效治理等方面展开优化设计。结果表明,科学的集成路径不仅提升了系统运行效率,也为石化企业带来了巨大的潜在经济增益。

**关键词:**石化企业;碳减排;技术集成;系统优化;经济效益

中图分类号:TE65; X322 文献标识码:A 文章编号:1674-5167(2025)026-0091-03

## Research on the Integrated Optimization Pathway of Carbon Emission Reduction Technologies in Petrochemical Enterprises and Its Economic Benefits

Du Kang (Sinopec Shengli Oilfield Petrochemical Plant, Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** With the global advancement of carbon neutrality goals, petrochemical enterprises are facing increasing pressure to reduce emissions. To achieve sustainable development, enhancing the systematic integration of carbon reduction technologies has become crucial. This study systematically reviews the current implementation status of emission reduction technologies in the petrochemical industry, identifying key issues such as insufficient technological coordination, weak system coupling, and suboptimal resource allocation in the carbon reduction process. Based on this analysis, an adaptable and actionable integrated optimization pathway for carbon reduction technologies is constructed, focusing on synergistic energy systems, deep process integration, and efficient end-of-pipe emission treatment. The results demonstrate that a scientifically designed integration pathway not only improves system operational efficiency but also generates significant potential economic benefits for petrochemical enterprises.

**Keywords:** petrochemical enterprises; carbon emission reduction; technology integration; system optimization; economic benefits

石化行业能耗比较高,属于高排放典型代表企业类型,石化企业的碳排放总量占据工业总量比重较大,需要着重优化、改善<sup>[1]</sup>。现在,全球对气候变化的关注越来越多,很多国家都开始提出碳达峰和碳中和的目标。这些目标不仅是环保的需要,也成为推动传统产业转型升级的重要方向。对于石化企业来说,情况更加复杂。一方面,它们要保证正常的生产不能出问题;另一方面,又必须尽量减少碳排放强度,在资源和环境压力越来越大的背景下,传统的发展模式已经不太适用了。为了实现减排,企业必须走集成和优化的道路。这里的“集成”不只是把几种技术简单放在一起,更重要的是要考虑这些技术是不是适合当前的工艺流程,能不能配合好,做到效率最大化。所以,深入研究这些减排技术怎么组合,怎么优化,在石化企业内部形成一个整体的协同系统,不但可以提高减排的效果,还能帮助企业走向更加绿色和可持续的发展道路。

### 1 石化企业碳减排技术常见问题分析

#### 1.1 减排技术体系分散与工艺脱节

石化企业目前在碳减排过程中普遍存在技术部署

零散、系统化水平低的问题,多个技术环节在实际应用中往往缺乏有机衔接<sup>[2]</sup>。由于石化生产流程本身具有高度连续性与复杂性,传统减排技术往往以独立模块形式存在,未能实现与工艺流程的深度融合。这种脱节导致各技术单元之间的资源流、能量流和信息流协调不畅,制约了减排效果的系统提升。同时,一些先进减排工艺由于与原有装置匹配性差,导致技术效能无法充分发挥,形成技术孤岛现象,进而增加了系统运行的不确定性和风险。

#### 1.2 能源系统协同能力不足

在石化企业的生产过程中,其能源系统是企业大量碳排放的主要来源。所以,能源系统结构的合理化程度,就会直接影响到碳减排技术真正实施的基础和难度。但目前来看,很多企业的能源系统运行还是比较粗放的。能源的使用方式,很多企业还是比较单一化,转换效率也不够高<sup>[3]</sup>。在系统的管理上,主要靠的是局部优化的做法,根本没有一个从全厂角度去统筹的能源协同机制。另外,热、电、蒸汽这些不同形式的能源之间,在转换和调控方面,也缺乏一个统一的平台。所以各类能源在流动的过程中,是没办法做

到很好互动的。

### 1.3 排放治理端系统响应滞后

在排放治理环节，部分石化企业仍存在“末端治理”思维占主导的问题，排放控制系统对工艺变化的响应能力较弱<sup>[4]</sup>。碳排放治理设施在设计与配置上往往滞后于生产流程优化，未能做到实时调节与动态协同，难以满足现代化工艺多变性与高强度运行条件的需求。此外，排放数据获取的实时性和精度也不高，影响了治理系统的精准控制与智能化水平。缺乏快速响应机制，使得排放治理系统无法与生产系统高效联动，导致部分碳减排潜力被压缩，治理效率下降，资源浪费问题加剧。

## 2 石化企业碳减排技术集成优化路径

### 2.1 构建流程耦合的减排技术架构

针对碳减排技术和实际工艺流程脱节这个问题，石化企业要尽早构建出一套可以进行流程耦合的碳减排技术架构，为减少碳排放目标提供服务<sup>[5]</sup>。在技术优化方面，企业可以重点关注原料加工、反应工程、还有分离提纯这些关键的工艺环节。借助流程模拟和系统集成之类的方法，识别出流程中不必要的重复和影响效率的障碍，然后进行相应的调整，提升整个减排流程的协调性和效率。企业可以利用一些流程强化方面的技术手段，把诸如碳捕集、废气处理和热能回收这些减排相关的步骤，尽量嵌入到工艺流程的主干之中，形成一个闭环系统，让整个流程更加完整和紧凑。

在技术实施方面，应基于成熟的流程模拟平台开展减排单元的动态建模与多工况分析，运用多目标优化策略在能耗、碳排放与经济性之间寻求最优解。静态-动态耦合模拟与多尺度建模工具可用于增强对能量与物质流的精准描述，提升系统层面的集成效率与运行稳定性。例如，在反应器单元中引入 CFD 模拟优化碳捕集剂分布与反应动力学参数；在系统层面采用 Pinch 分析优化热集成网络，实现最大化热回收与最小化外部能耗。同时，应在流程设计初期引入 LCA（生命周期评估）与 TEA（技术经济分析）联合评估技术路径的碳足迹与经济可行性，避免后期系统冲突与减碳成本失衡。

### 2.2 构建协同驱动的能源优化机制

为了让能源系统能有更好的协同表现，石化企业应当要从协同驱动的角度出发，努力建立起一套更强的能源优化机制。这个机制要围绕整个能源系统来做，从能源的输入、转换、输出等各个环节的整体运作效果来看，统筹的考虑全局，系统性的进行集成和再设计。比如，在设计整个能源管理系统的时候，可以考

虑去搭建一个“热-电-冷”多联供体系，进行互相配合，能量的利用效率在这个机制下就会更高。然后，在能源调度方面，企业也应该要建立一个统一的平台，把锅炉系统、余热回收装置、发电设备等原来分开的各个能源管理环节，集中到一起进行协调。本质上，就是要打破过去那种分散管理格局，让能源的梯级利用可以变得更加合理，更少浪费。

另外，企业还要根据用能的实际情况，动态调整自身的能源分配策略。比如，假设对不同设备的能源负荷进行预测之后，发现有的设备能耗需求更大，那就要及时的调整能源的供给目标。这样不但可以优化整体的能源结构，还能让整个企业的用能梯度变得更加科学、可控。

为了更好的管控能耗的水平，也可以安装一些智能化的能源管理系统，实时监控能耗数据，根据不同设备的预设参数，自动进行能源供给调整，减少那些本来可以避免的能量损失。在能源系统的设计阶段，建议可以优先采用模块化思路，同时考虑系统的可扩展性。这样的话，即使以后生产条件发生了变化，系统也能更加灵活地适应新的用能需求，企业可以更加长期稳定的控能控碳，为企业构建更为高效的能源体系、实现碳减排目标打好重要基础。

### 2.3 构建智能响应的排放治理平台

在排放治理的过程中，石化企业应要尽早建设一个能够快速响应的智能化平台。这个平台至少要做到三个方面的整合：第一是要能够识别污染源的位置和种类，第二是要可以对排放路径进行持续的监测，第三是要能够对各个治理单元进行动态调节和管理。为实现上述功能，平台需预先部署先进的感知技术与高精度数据采集设备。典型的硬件配置包括傅里叶变换红外光谱仪（FTIR）、激光雷达系统（LIDAR）以及工业无线传感网络（Industrial Wireless Sensor Network, IWSN），以实现对二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、挥发性有机物（VOCs）、二氧化碳（CO<sub>2</sub>）等多种污染因子的实时监测、空间定位与演化趋势分析。在数据分析和决策方面，可以引入人工智能技术和自动控制算法。

比如，可以通过边缘计算来建立一个治理控制模型，这个模型最重要的是要能根据现场工艺参数的变化及时做出反应，自动调整系统的运行策略。在控制的具体实现中，可以结合预测控制（MPC）和鲁棒控制的算法模型来设计。

那么如此一来，控制系统就可以通过对过去的数数据的训练，在遇到新的扰动时快速作出反应。举个例子，如果发现催化燃烧装置出口的温度或气体浓度发

生了变化，系统就能自动调节进气速度、助燃剂的流量等参数，确保排放达到标准。在治理设备的配置方面，也要注重灵活性。可以采用模块化设计，让不同的治理装置根据实际负荷进行组合和优化，这样就可以提高不同运行状态下的处理效率。另外，还可以使用数字孪生技术，也就是建立一个虚拟的治理装置模型。通过这个虚拟模型，可以提前模拟各种治理方案的效果，并在实践中进行改进和迭代。

除此之外，还可以引入全生命周期的评价方法，对治理措施的资源消耗、能源使用和环境效益进行全面评估，帮助企业不断优化治理系统，推动从传统的静态治理方式向更加灵活的动态调控方式转变。最后，在平台系统的架构设计上，建议采用开放式通信协议（OPC-UA）配合工业边缘计算设备（比如Edge PLC）共同部署。这样既可以保证数据处理的速度，又方便后期进行系统扩展和升级。通过这一整套系统，最终目标是实现“看得见、算得准、调得动”的全过程治理闭环，也为石化企业向绿色智能方向转型提供了技术保障。

### 3 优化路径的经济效益研究

#### 3.1 提升流程协同效能降低运营成本

通过在减排技术与生产流程之间实现深度耦合，可有效减少系统能耗与原料损耗，进而降低单位产品的边际成本。优化路径强化了各减排技术模块间的协作性，缩短了物料在系统中的停留时间，减少了非生产性循环与无效能流动，从而提升整体运营效率。在流程集成的基础上，企业可减少重复投资与维护支出，降低固定资产占用，释放部分资本资源用于其他生产环节。系统结构的优化亦有助于减轻对外部能源与资源的依赖，间接增强企业在市场中的价格竞争力。

#### 3.2 优化能源系统结构推动资源节约

能源系统的协同优化，本质上是提高了能源的利用效率。也就是说，生产同样数量的产品，现在所需要的能源变少了。这样一来，系统在运行过程中需要花的钱也随之减少了。在这个过程中，多种能源的联合供给机制也是起到了关键的作用。因为不同类型的能源之间，可以进行合理的梯级转换了，还可以把原来会浪费掉的余热回收再利用。那么这些能量久可以在系统内再次的循环使用，所以对外部能源的依赖自然就少了，这自然也就节省了能源采购的成本，也减少了能源浪费。

另外，智能化的能源调度技术也在一定程度上帮助提高了系统运行的稳定性。因为当外部环境或者能源负荷发生波动的时候，系统不会轻易出现问题了。这样就可以避免一些计划外的停产情况，减少资源的

损失。所以，对能源系统的结构优化之后，企业就能建立起一个更稳的运行模式。不仅抗波动能力更强了，还能间接的提高企业对风险的应对能力，让经济收益变得更加稳定。

#### 3.3 增强治理系统智能性提高投资回报

智能化排放治理平台的建设，不仅优化了治理资源的投入方式，还显著提高了治理过程的效率与可靠性。通过精准控制与动态响应，企业可以根据不同运行工况灵活调整治理策略，避免资源浪费，提高装置运行时间的经济有效性。

治理系统的模块化设计减少了系统整体改造成本，同时提高了技术更新与扩展的灵活性，缩短了投资回收周期。治理平台的智能化水平提升，使其具备持续优化与自我学习能力，为长期运行带来了持续的经济回报空间。

### 4 结语

在碳减排的大背景之下，石化企业进行技术转型，不仅是关乎到了企业的环境责任，更是深切影响着企业的经济增长和产业升级。这个过程中，企业其实不只是简单地减少碳排放，而是要通过多方面的技术组合，来实现整体的优化。像是流程的配合、能源的统一使用，还有智能化的管理手段，都是这个转型里面比较关键的部分。那么通过这些方式，企业就可以从以前单一的减排方式，慢慢转向一种更加系统、更为全面的减排模式。

这种模式不只是对环境有好处，对企业的内部生产方式也会产生比较大的影响，从而带来更加稳定、也更加长远的经济效益。可以说，这样的转变，不但改变了企业的生产逻辑，也增强了企业自身的适应能力和市场竞争力。所以，继续推动碳减排相关技术的整合和优化，其实是石化企业必须要走的一条道路。因为这不仅是为了跟上时代的政策要求，更是可以实现企业高质量发展的重要动力之源。

#### 参考文献：

- [1] 张朋程,李伟娟.我国石化行业碳减排实现路径研究[J].价格理论与实践,2023,(12):116-121.
- [2] 朱静晗.实现石化行业碳减排装置规模化分析[J].节能与环保,2022,(11):45-46.
- [3] 袁明江,王志刚,谢可堃.石化企业碳达峰碳中和实施路径探讨[J].国际石油经济,2022,30(04):98-103.
- [4] 赵璇,武慧娟,孙慧.石化企业碳核算现状及未来展望[J].山东化工,2024,53(22): 92-97.
- [5] 丁书兵,闫俊芬,黄汝庆.浅析双碳形势下地方炼化企业碳减排[J].新疆钢铁,2024,(01):52-54.