

碳中和目标下 CO₂ 捕集工艺的动态安全边界分析与控制策略

徐国兵

法利投资（上海）有限公司 上海

【摘要】实现碳中和目标的关键路径之一是高效且安全的 CO₂ 捕集工艺。本文围绕 CO₂ 捕集过程中的动态安全边界进行深入分析，揭示工艺运行中潜在的安全风险及其变化规律。基于动态安全边界理论，提出适应工艺动态特性的控制策略，以保障系统在不同工况下的稳定与安全运行。动态安全边界方法能够有效识别并预防工艺异常，提升 CO₂ 捕集系统的可靠性，为碳中和实施提供技术支撑和理论指导。

【关键词】碳中和；CO₂ 捕集；动态安全边界；控制策略；系统安全

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250052

Dynamic safety boundary analysis and control strategies for CO₂ capture processes under carbon neutrality goals

Guobing Xu

Farley Investment (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai

【Abstract】One of the key pathways to achieving carbon neutrality goals is the development of efficient and safe CO₂ capture processes. This paper conducts an in-depth analysis of the dynamic safety boundaries in CO₂ capture processes, revealing potential safety risks during process operation and their changing patterns. Based on dynamic safety boundary theory, control strategies adapted to the dynamic characteristics of the processes are proposed to ensure stable and safe system operation under different working conditions. The dynamic safety boundary method can effectively identify and prevent process anomalies, enhance the reliability of CO₂ capture systems, and provide technical support and theoretical guidance for the implementation of carbon neutrality.

【Keywords】Carbon neutrality; CO₂ capture; Dynamic safety boundary; Control strategy; System safety

引言

当前碳中和目标已成为全球应对气候变化的重要方向，推动碳减排技术的快速发展。CO₂ 捕集作为实现碳减排的核心技术，其安全性直接关系到工艺的可靠运行与环境保护。然而，传统的安全分析多基于静态边界，难以适应捕集工艺复杂多变的动态特性，存在潜在风险被忽视的可能。针对这一挑战，动态安全边界分析方法应运而生，能够实时反映工艺运行状态的变化，及时预警安全隐患。结合控制策略的设计，不仅提升系统的安全防护能力，也为碳中和过程中 CO₂ 捕集技术的稳定实施提供保障。本文从动态安全边界的视角出发，探讨 CO₂ 捕集工艺的安全风险管理和控制优化，为相关领域提供理论支持和技术参考。

1 CO₂ 捕集工艺中的安全风险分析及动态特性

探讨

碳中和目标的推进使得 CO₂ 捕集技术成为减少温室气体排放的关键环节之一。CO₂ 捕集工艺涉及复杂的物理和化学过程，这些过程在不同运行条件下表现出明显的动态特性。工艺中存在多种潜在的安全风险，包括但不限于设备超压、温度失控、吸收剂泄漏及系统振荡等^[1]。由于捕集系统通常包含吸收塔、再生单元和压缩设备等多个关键单元，其动态行为会受到工艺参数变化、操作条件波动以及外部扰动的影响，使得传统的静态安全分析方法难以全面反映实际运行中的风险特征。动态安全风险表现为工艺变量在时间上的变化趋势和波动范围，这种特性要求对系统安全边界进行动态监测与评估，以防止事故发生。

在 CO₂ 捕集过程中，操作条件的快速变化往往

导致系统非线性响应,增加了工艺控制的难度。吸收剂浓度、气液流量、温度和压力等关键参数的波动,直接影响捕集效率和安全性能。吸收剂浓度过高可能引起设备腐蚀和堵塞,而温度异常升高则可能导致吸收剂分解,释放有害气体,威胁设备安全。再生单元的热管理同样重要,热量输入不稳定会引发再生效率波动,进而影响整体系统的稳定性。系统振荡和动态响应特性使得单一静态参数难以反映实际安全状态,必须依赖动态数据分析和实时监控手段对系统风险进行准确识别和预测。

针对上述问题,动态安全边界的概念逐渐成为研究热点,强调在工艺动态演变过程中确定安全操作范围。通过建立基于非线性动力学和状态空间模型的动态安全边界,可以揭示系统在不同工况下的稳定区域和潜在失稳模式。动态安全边界分析不仅帮助理解工艺中复杂的时变风险,还为制定针对性控制策略提供理论基础。结合现代传感技术和数据驱动模型,实现实时动态安全评估成为可能,为 CO₂ 捕集工艺的安全管理提供了有力支持。这种动态风险识别与管理方法对于保障碳中和背景下的 CO₂ 捕集系统稳定高效运行具有重要意义。

2 动态安全边界理论及其在 CO₂ 捕集中的应用框架

动态安全边界理论为复杂工业过程中的安全分析带来了全新的方法和视角,特别适合应对 CO₂ 捕集工艺中多变且复杂的操作环境。该理论依托非线性动力学和控制系统理论,利用系统的状态空间模型,能够在不同工况和外部扰动条件下,精确识别系统的稳定运行区域。与传统的静态安全边界不同,动态安全边界考虑了时间维度和系统状态变量的动态演变,能够实时反映工艺过程中安全状态的变化。这种方法不仅提高了安全评估的准确性,还能更有效地捕捉潜在的风险和异常行为,为复杂工艺提供更加科学和动态的安全保障。

在 CO₂ 捕集应用中,动态安全边界的构建依赖于对工艺过程的数学建模和参数辨识,涉及传质、反应动力学及热力学等多方面内容。通过建立捕集单元的多变量耦合模型,可以模拟系统在不同操作条件下的动态响应。该模型结合实时监控数据,利用非线性控制理论计算出系统的可行稳定区域。动态安全边界的确定不仅考虑了工艺设备的物理极限,

还融合了系统的扰动容忍度与恢复能力,从而为风险预警和故障防范提供依据。此方法能够有效识别接近临界状态的工况,避免传统安全分析中存在的盲区和延迟。

将动态安全边界理论应用于 CO₂ 捕集工艺的安全管理,不仅极大提升了安全评估的精度,还为智能控制策略的开发奠定了坚实的理论基础。基于动态安全边界构建的控制框架,能够对关键工艺参数进行实时监控和动态调节,通过闭环反馈机制不断优化运行状态,有效控制潜在风险,确保系统始终处于安全稳定的运行区间。结合先进的传感器技术和大数据分析手段,动态安全边界分析能够实现与过程控制系统的无缝融合,推动工艺安全的自动化监控和智能决策^[2-6]。该控制框架的广泛推广,为碳中和目标背景下的 CO₂ 捕集技术提供了强有力的安全保障,提升了工艺的整体稳定性与安全性,助力工业领域的低碳转型和可持续发展进程。

3 基于动态安全边界的控制策略设计与实现

基于动态安全边界设计的控制策略,核心目标是大幅提升 CO₂ 捕集工艺的运行安全性与系统稳定性,确保面对复杂多变的工况波动和突发扰动时,系统依然能够保持良好运行。设计过程中,将动态安全边界作为关键约束条件,结合工艺本身的动态特性,构建出具有高度适应性的控制模型。该控制策略注重对关键运行参数的实时监控,通过对系统状态的动态边界判断,能够及时调整相关操作变量,有效防止系统越界进入危险区。更为重要的是,控制策略不仅关注当前系统状态,还结合未来状态的预测趋势,实现前瞻性风险管理,保障工艺在复杂环境下的安全与稳定持续运行。

控制策略的实现高度依赖于多传感器数据的融合以及高效智能算法的支持。通过布设先进的传感器网络,能够实时采集包括温度、压力、气液流量以及吸收剂浓度等关键工艺参数,确保控制系统对捕集过程的运行状态有全面、精准的掌握。基于动态安全边界的控制算法往往结合非线性模型预测控制(NMPC)、滑模控制(SMC)以及鲁棒控制等先进方法,针对复杂的非线性动态系统,保障系统在各种扰动和不确定性条件下保持稳定^[7]。利用这些智能控制技术,系统可以动态调节吸收剂注入量、加热功率和压力等关键操作参数,避免由于参数波动

带来的安全隐患。通过算法的持续优化,控制策略不仅确保了系统运行的安全性,还在提升 CO₂ 捕集效率和能源利用率方面发挥了重要作用,促进了工艺的绿色和高效发展。

在实际应用中,基于动态安全边界构建的控制策略显著提升了 CO₂ 捕集系统应对异常事件的能力。当突发扰动发生时,控制系统能够迅速感知安全边界的变化,及时采取保护措施或调整关键运行参数,有效避免事故的扩散和设备损坏。该策略不仅增强了系统的安全防护能力,还为工艺的自动化与智能化管理奠定了坚实基础,使 CO₂ 捕集设备具备更强的自主运行能力和环境适应性。随着技术的不断优化和升级,这种动态安全边界控制策略能够灵活应用于不同规模和多样化工艺的 CO₂ 捕集装置,推动碳中和背景下工业减排技术的安全、稳定和高效发展。

4 动态安全边界分析对 CO₂ 捕集工艺安全性的提升效果研究

动态安全边界分析在 CO₂ 捕集工艺中的应用,有效提升了系统整体安全性能,解决了传统静态安全评估方法存在的不足。该分析方法通过实时监控系统状态变量的动态变化,准确界定了系统的安全运行区域,使得潜在风险能够在早期被识别和控制。相较于静态边界,动态安全边界能够适应工艺过程中的非线性和时变特征,反映设备运行状态的即时变化,为安全管理提供了更加灵活且科学的依据。这种动态化的安全评估策略极大地减少了工艺异常引发的事故风险,保障了 CO₂ 捕集系统的稳定运行和生产效率。

结合具体工艺运行数据,动态安全边界分析能够揭示不同操作条件下系统的临界状态及其演变规律。在吸收塔和再生单元的运行过程中,温度和压力的动态波动直接影响捕集效率和设备安全。动态安全边界分析通过数学模型和状态估计,捕捉这些波动的边界变化,及时发现接近失稳的信号。此方法还能识别系统因外部扰动或设备故障引发的异常动态行为,帮助运维人员快速定位问题,采取针对性的调控措施。通过实时数据与模型的结合,动态安全边界分析不仅提高了工艺的安全预警能力,还为控制策略的优化提供了有力支持,促进了 CO₂ 捕集系统的智能化管理。

实际应用中,动态安全边界分析显著增强了

CO₂ 捕集工艺的抗扰动能力和故障恢复能力。在面临不确定工况或突发事件时,系统能够依靠动态边界判别风险级别,自动调整操作参数,避免运行偏离安全区域。这种能力有效降低了设备损坏和环境泄漏的概率,提高了工艺的连续性和经济性^[8]。动态安全边界的引入推动了数字化工厂和智慧能源管理的发展,使得 CO₂ 捕集过程能够实现更加精细化和动态化的安全控制。通过动态安全边界分析技术的持续完善和推广,碳中和目标下的 CO₂ 捕集工艺安全性得到大幅提升,保障了工业减排技术的可持续和高效运行。

5 结语

动态安全边界分析为 CO₂ 捕集工艺的安全管理提供了创新性的解决方案,显著提升了系统在复杂工况下的稳定性与可靠性。通过实时监控与动态调整,控制策略有效防范了潜在风险,确保了工艺的安全高效运行。随着技术的不断进步,动态安全边界将在碳中和进程中发挥更加关键的作用,推动 CO₂ 捕集技术向智能化、精细化方向发展,为实现绿色低碳目标贡献坚实保障。

参考文献

- [1] 魏浪浪,周永山,姚文琴,等.CO₂ 捕集与液态阳光—CO₂ 加氢制甲醇技术研究进展[J/OL].石油石化绿色低碳,1-11[2025-05-19].
- [2] 魏静,邓敏,银登国,等.“双碳”背景下钢铁行业 CO₂ 捕集研究进展[J/OL].能源环境保护,1-13[2025-05-19].
<https://doi.org/10.20078/j.eep.20250316>.
- [3] 邓晨庆,刘淼儿,程昊,等.Laval 喷管捕集天然气中 CO₂ 的数值研究[J].低温与超导,2025,53(03):73-80.
- [4] 贺常乐,祁燕海,刘小龙,等.碳中和背景下新型碳捕集装置在地下空间 CO₂ 处理中的应用设计[J].节能,2024,43(05): 95-97.
- [5] 王菽菲.超重力场中胺功能化 Al₂O₃ 吸附剂直接捕集空气中 CO₂ 的基础研究[D].中北大学,2024.
- [6] 顾锦阳.胺功能化废纸碳气凝胶制备与模拟烟气中 CO₂ 捕集的实验研究[D].华中科技大学,2024.
- [7] 马旭,滕亚栋,刘杰,等.喷雾法水合物法捕集分离烟道气中 CO₂[J].化工学报,2024,75(05):2001-2016.
- [8] 穆中华,张平,白剑锋,等.油田伴生气中 CO₂ 捕集与液化技术研究[J].油气田地面工程,2023,42(07):1-5.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS