

化工搅拌器叶轮多目标优化设计及混合效率提升

李世勋

内蒙古君正能源化工集团股份有限公司 内蒙古乌海

【摘要】化工搅拌器叶轮的设计直接影响着混合效率与过程质量。传统的叶轮设计往往无法满足多目标优化的需求，特别是在提高混合效率、降低能耗和提升操作稳定性方面。本文提出了一种基于多目标优化的方法，针对搅拌器叶轮进行性能优化设计，结合数值模拟与实验数据分析，探索不同类型叶轮在优化过程中的效果。通过对比优化前后搅拌器的混合效率、能耗和稳定性，发现优化后的叶轮在提高混合效率的有效降低了能量消耗。研究结果为化工搅拌器叶轮设计提供了新的思路和方法，具有重要的工程应用价值。

【关键词】化工搅拌器；叶轮设计；多目标优化；混合效率；能效

【收稿日期】2025年5月14日

【出刊日期】2025年6月20日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250060

Multi-objective optimal design of impeller for chemical reactor agitators and enhancement of mixing efficiency

Shixun Li

Inner Mongolia Junzheng Energy Chemical Group Co., Ltd. Wuhai, Inner Mongolia

【Abstract】 The design of impellers for chemical reactor agitators directly influences mixing efficiency and process quality. Traditional impeller designs often fail to meet the requirements of multi-objective optimization, especially in improving mixing efficiency, reducing energy consumption, and enhancing operational stability. This paper proposes a multi-objective optimization approach for performance optimization of agitator impellers. By combining numerical simulation with experimental data analysis, the effectiveness of different impeller types during the optimization process is investigated. Comparisons of mixing efficiency, energy consumption, and stability before and after optimization reveal that the optimized impeller improves mixing efficiency while effectively reducing energy consumption. The research results provide new insights and methodologies for the design of chemical reactor agitator impellers, demonstrating significant engineering application value.

【Keywords】 Chemical reactor agitator; Impeller design; Multi-objective optimization; Mixing efficiency; Energy efficiency

引言

化工搅拌器作为液-液、气-液及固-液反应中的关键设备，广泛应用于化学工程、制药、食品加工等行业。叶轮是搅拌器的核心组件，其设计对混合过程的效率与能耗具有显著影响。传统叶轮设计多依赖经验，缺乏系统的多目标优化策略，难以在提高混合效率的同时有效控制能量消耗。随着化工工业的持续发展，对搅拌器的性能要求愈发严苛，如何在满足高混合效率的基础上减少能源消耗和操作成本，成为亟待解决的问题。本文通过对叶轮设计中的关键参数进行优化，提出了一种多目标优化方法，并通过

数值模拟与实验验证，探索优化设计在提升混合效率和节能方面的应用。

1 化工搅拌器叶轮的设计挑战与优化需求

化工搅拌器叶轮的设计在很多化工过程中发挥着至关重要的作用，尤其是在混合效率和能效方面。传统设计方法主要依据经验与常规计算，难以系统化地优化多个设计目标，导致叶轮在实际应用中难以满足现代化化工流程中对混合效率、节能和操作稳定性的高要求^[1]。如今，随着工业生产规模的不断扩大和对资源节约的日益关注，传统的叶轮设计模式已不能有效应对新的挑战。尤其是在高粘度流体混

合、大规模连续生产和高能效要求等领域,现有的叶轮设计普遍存在混合效率低、能耗高和易损等问题。

在复杂的化工反应过程中,搅拌器的设计不仅需要满足物料的充分混合,还需要考虑流体的流动性、反应的时间和各组分的分布。为了在有限的时间内完成高效的混合,叶轮必须具备良好的流场分布和较高的搅拌能力,这就要求叶轮的几何形状、转速和材料的选择都要根据多目标优化策略进行调整。如何在保持混合效率的减少不必要的能量消耗,成为设计过程中亟待解决的难题。叶轮设计不仅仅是单一目标的追求,而应是多个目标间的权衡与优化,以实现最优的工艺效果。

为了应对化工搅拌器叶轮设计中的挑战,现代工程计算和模拟技术成为不可或缺的工具。CFD(计算流体力学)模拟通过对叶轮内部流场的精确分析,能够帮助设计人员理解流体流动、剪切力分布等关键因素,从而优化设计参数。结合多目标优化算法,设计人员不仅可以提升叶轮的混合效率,还可以在能效、耐用性和成本之间找到最佳平衡点。优化设计还需考虑搅拌器在实际生产中对操作稳定性的影响,确保设计方案在长时间运行中具备较高的可靠性。环保因素也逐渐成为设计中的重要考虑,如何减少能源消耗和降低对环境的负面影响,成为优化设计的另一个重要目标。

2 基于多目标优化的叶轮设计方法研究

叶轮设计的多目标优化方法主要通过计算机辅助设计(CAD)、计算流体力学(CFD)仿真与多目标优化算法结合进行实现。在设计过程中,优化的目标不仅仅是提升混合效率,还包括减少能量消耗、降低设备磨损及延长使用寿命等多个维度。现代多目标优化方法,如遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)和模拟退火(SA),通过对多个设计目标的平衡优化,能够为叶轮设计提供更加精确的解决方案。通过这些算法,设计人员可以同时考虑多个约束条件,如叶轮的几何形状、流速分布、能效比以及物料的流动性等,从而实现综合性能的最大化。

通过CFD模拟,设计者可以在不同的设计参数条件下,观察搅拌器叶轮的流体动力学特性。CFD技术能够模拟叶轮的流场分布、压力场和速度场,评估不同叶轮设计的流动性能,并为优化设计提供数据支持^[2-6]。在多目标优化过程中,通过定义合适的目标函数,可以将混合效率、能量消耗、设备磨损等目

标进行权衡。遗传算法等优化方法能够通过模拟自然选择过程,不断调整叶轮的设计参数,最终找到最适的设计方案。在优化过程中,设计者还可以根据实际需求,调整每个目标的权重,以适应不同工艺要求。

多目标优化方法在化工搅拌器叶轮设计中的应用具有显著优势,特别是在处理复杂的非线性问题时表现尤为突出。在传统设计方法中,许多设计变量之间存在着高度非线性的关系,这使得传统优化方法往往难以找到最优解,或者在多个目标之间难以取得有效平衡。然而,智能优化算法如遗传算法、粒子群优化算法等,能够通过模拟自然进化过程或群体智能的方式,突破传统方法的局限,自动调整设计参数,找到更加符合实际需求的最佳解。这些智能算法可以在处理高度非线性的关系时,更加高效地进行多目标优化,确保在提高混合效率的实现能量消耗的最小化。通过引入这些先进的算法,叶轮设计的综合性能得到了显著提升,能够更加精准地满足化工生产过程中的复杂需求,为工艺优化提供了有力的技术支持和创新路径。

3 数值模拟与实验验证的优化效果分析

数值模拟技术在化工搅拌器叶轮优化中的应用,能够帮助设计人员通过虚拟实验来验证不同设计方案的效果。通过CFD模拟,设计者能够在计算机上预见叶轮在不同工作条件下的表现,包括混合效率、能量消耗和流体动力学特性。模拟结果能够为实际实验提供指导,减少了实验的次数和成本,同时也加快了设计优化过程。通过数值模拟,设计者可以对叶轮的几何形状、转速和操作条件等因素进行系统分析,并预测其在实际生产中的表现,从而为优化方案的选择提供依据。

数值模拟的结果仅仅是理论上的预测,实际实验验证才是检验设计优化效果的关键。在实验过程中,通过搭建实际的搅拌器原型和进行一系列操作测试,能够对数值模拟结果进行验证,并进一步优化设计。实验数据可以与模拟结果进行对比分析,判断优化设计是否真正达到了预期效果。通过测量搅拌器的混合时间、能耗和产品质量等参数,能够直接评估叶轮设计的实际效果。如果模拟与实验结果相符,说明优化设计方案具有较高的可靠性;如果存在差异,则需要根据实验反馈进行进一步调整。

数值模拟与实验的结合在优化设计中发挥着至关重要的作用。通过数值模拟,设计者能够在计算机

环境中预见叶轮在不同工况下的表现，进行初步的性能预测，这不仅可以帮助优化设计的方向，还能够节省大量实验成本。然而，数值模拟仅能提供理论上的预估，而实际实验则是验证设计效果的关键步骤。在实验过程中，往往会暴露出诸如材料不匹配、制造误差或者操作不当等问题，导致设计方案的性能与预期存在偏差。数值模拟与实验验证的结合，能够有效弥补模拟中无法考虑的实际因素，并通过实测数据对模拟结果进行校正^[7]。通过不断迭代优化设计，设计团队可以识别和修正潜在问题，从而确保最终设计方案能够在实际生产中稳定运行。在此过程中，不仅能够显著提升混合效率，还能优化能效，减少资源浪费，并有效降低运营成本，为化工生产的可持续发展提供强有力的技术支撑。

4 优化设计对混合效率与能效的影响

叶轮设计的优化对于提升混合效率和降低能耗具有显著作用。在多目标优化过程中，设计人员通过平衡不同的目标函数，成功提升了搅拌器叶轮的混合效率，同时降低了能量消耗。在优化后的叶轮设计中，通过改善叶轮几何形状和流体动力学性能，有效提高了物料的混合速度和均匀性。优化设计使得叶轮能够更好地推动流体，减少了因不合理设计而产生的能量浪费。优化设计还可以减少叶轮与其他部件的磨损，延长设备的使用寿命，进一步提高整体能效。

叶轮的设计对混合效率的提升关键在于合理调整叶轮的几何形状和结构参数。通过改变叶片的角度、厚度以及数量等因素，可以有效地改变流体的流动路径与速度分布，从而提高流体的剪切力和搅拌效果。这些调整能够在不增加能量消耗的前提下，增强混合过程中的物质传递和流动均匀性，避免了因不均匀流场而产生的混合死区。叶轮几何参数的优化使得流体在搅拌器内的流动更加稳定，减少了能量的浪费，进而有效降低了能耗^[8]。在多目标优化框架下，设计人员能够根据不同工艺需求，精确地平衡混合效率和能量消耗之间的关系，使得最终设计方案既能提升混合效率，又能保证能效最优化。这一过程中，通过精确的设计与分析，可以大幅提升搅拌器的总体性能和生产效率，推动更为节能高效的化工生产。

在优化过程中，通过对叶轮设计的多次模拟和实验验证，能够精确评估其对混合效率和能效的影响。优化设计后，搅拌器的能量消耗大幅下降，且混合效率有了显著提升。在实际应用中，这种优化设计

能够在确保工艺要求的显著降低生产成本，提高企业的经济效益。通过优化设计，搅拌器不仅能更高效地完成混合任务，还能为节能减排做出贡献，推动化工行业朝着更可持续的方向发展。

5 结语

本文通过多目标优化方法对化工搅拌器叶轮进行设计优化，结合数值模拟与实验验证分析了优化方案的效果。研究表明，通过调整叶轮的几何参数，能够有效提高混合效率，减少能量消耗，进而提升搅拌器的整体性能。在优化过程中，数值模拟为设计提供了理论支持，实验验证则确保了方案的可行性与实际应用效果。最终，优化设计不仅提高了工艺效率，也降低了运营成本，为化工生产的节能降耗与可持续发展提供了新的技术路径。该研究为搅拌器叶轮的设计提供了理论依据和实践指导，具有重要的工程应用价值和广泛的推广前景。

参考文献

- [1] 元航,杨莹.水泵叶轮失效分析与改进设计研究[J].今日制造与升级,2025,(07):179-181.
- [2] 刘强.离层注浆研石浆液搅拌器的结构设计与流场模拟[J].煤炭加工与综合利用,2025,(07):103-106.
- [3] 李连星,陈振生,林祥春.智能化搅拌设备在化工生产中的集成控制应用[J].造纸装备及材料,2025,54(07):49-51.
- [4] 杨军虎,李佳旭,杨春野,等.基于三工况离心泵叶轮的设计方法研究[J].液压气动与密封,2025,45(07):17-24.
- [5] 王立杰,胡杰,孙建伟,等.化工多级离心泵叶轮优化设计研究[J].石油和化工设备,2025,28(07):48-51.
- [6] 韩爱文,张帅帅.基于流体动力学的丙烯压缩机叶轮设计优化研究[J].化工管理,2025,(19):149-152.
- [7] 白彦平,魏承.基于逆流设计的化工污水混合搅拌设备优化研究[J].自动化应用,2025,66(11):159-161.
- [8] 肖向前,鄢曙光,王志远,等.基于流场分析的脱硫塔搅拌器布置优化[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(01): 22-29.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本篇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