

基于强化学习的水泵测试参数动态优化策略

姚国伟

杭州沃德水泵制造有限公司 浙江杭州 311100

摘要: 随着智能制造和数字化工厂的快速推进,水泵产品的性能测试与质量控制日益成为企业核心竞争力的重要体现。传统水泵测试参数的设定与调整普遍依赖经验和人工,导致测试效率低下、资源消耗大且优化空间有限。面对多变量耦合、目标复杂和工况多变的现实挑战,本文提出一种基于强化学习的水泵测试参数动态优化策略,系统探索了深度强化学习算法在水泵测试参数调控过程中的建模、决策与应用机制。研究首先分析了水泵测试系统的动态特性,建立了状态空间、动作空间和奖励函数的数学描述。通过引入主流深度强化学习框架,实现了测试参数的智能动态调整,并结合数值仿真与实验平台对算法收敛性、测试效率与综合性能提升效果进行了系统评估。实验结果表明,所提策略不仅显著提高了测试过程的自动化与智能化水平,还实现了能耗、时间和准确度等多目标的协同最优。最后,本文结合水泵行业的测试智能化需求,展望了强化学习在智能测试、故障诊断和运维一体化等场景中的推广应用前景,并指出了后续优化与研究方向。

关键词: 强化学习; 水泵测试; 动态优化; 智能决策; 深度学习

引言

水泵作为国民经济与民生保障的重要基础装备,其制造和应用覆盖市政给排水、工业循环、农田灌溉等多个关键领域。水泵的出厂性能测试是衡量其产品质量和运行可靠性的核心环节,直接关系到后续工程的安全与能效表现。然而,受限于传统经验驱动的参数设定方式和人工调节机制,现有水泵测试普遍存在参数调整粗放、资源浪费严重和测试效率难以提升等痛点。尤其在多工况、多目标和多约束条件下,如何实现测试参数的动态自适应优化,成为智能测试技术研究和工程应用亟待突破的瓶颈。强化学习作为人工智能领域中关注自主决策与学习的前沿方法,已在智能控制、制造调度和工业优化等领域展现出广泛应用潜力。将强化学习引入水泵测试参数优化领域,有望打破传统优化模式,实现测试过程的高效、智能和全局最优。本文围绕水泵测试参数动态优化的理论体系、算法模型与工程实现展开系统研究,重点分析了强化学习模型构建、状态与奖励机制设计、测试仿真与实验验证等关键技术环节,旨在为水泵行业的智能测试升级和高质量发展提供新思路和新工具。

1 水泵测试参数优化的理论基础与发展现状

水泵性能测试是确保出厂产品符合国家标准与客户需求的必备环节,涉及流量、扬程、功率、效率、汽蚀余量、振动与噪声等多项指标。合理的测试参数设定不仅直接影响

数据的准确性和可追溯性,还关系到测试资源的利用效率和设备能耗水平。长期以来,水泵测试参数(如转速、测试流量、压力点采集间隔、测试时长等)主要依赖人工经验设定,工程师根据产品类型和历史经验选择典型测试点和参数区间,然后逐项采集并进行性能曲线拟合。这种方法在单一产品、标准化工况下能够满足基本需求,但在产品类型多样、应用场景复杂、个性化测试需求突出的现代制造环境下,已难以适应测试优化的高效率与高精度要求。

水泵测试参数优化面临多重挑战,主要体现在参数之间的高度耦合、多目标之间的矛盾冲突,以及测试环境和工况条件的动态多变性。具体来说,提高测试流量点的分辨率虽然有助于获得更加精细和准确的性能曲线,但同时也会显著延长测试时间,增加数据采集和处理的负担,从而推高能耗及人力成本。反之,采集点过少可能导致关键性能异常无法被及时检测,影响测试的全面性和有效性。此外,实际测试过程中设备的运行状态波动、环境条件的变化以及系统本身的测量误差,进一步增加了优化工作的复杂度和不确定性。面对这些挑战,参数优化不仅要求具备全局视野,还需实现动态调整和智能化管理。近年来,随着数字化工厂和智能制造的快速发展,一些企业尝试利用多目标优化、遗传算法、模糊控制等先进智能优化技术对水泵测试参数进行改进,这些方法在一定程度上提高了测试效率和准确性。然而,面对

复杂多变的工况，这些传统方法在动态自适应能力和全局寻优效率方面仍存在不足。强化学习作为一种基于数据驱动的自适应决策技术，能够通过与合作环境的实时交互不断探索和优化参数调整策略，展现出天然适应动态、多目标和复杂环境的优势，成为推动智能测试参数优化迈向更高水平的重要方向。

2 基于强化学习的水泵测试参数动态优化建模

强化学习通过智能体与合作环境的持续交互，基于奖励反馈不断更新决策策略，最终实现全局最优行为选择。将其应用于水泵测试参数优化，需首先构建合适的智能体、状态空间、动作空间和奖励函数。水泵测试系统可以视为一个包含多参数、多目标和动态反馈的复杂环境，测试过程中的每一步参数选择和调整都会对最终性能和测试效率产生影响。

在状态空间设计方面，需综合考虑水泵型号、历史测试参数、实时测试数据（如当前流量、压力、效率等）、环境信息（如温度、电源质量）以及设备健康状态等多维信息，形成完整的系统状态向量。动作空间则包括对测试转速、采集流量点、采集间隔、测试持续时间、传感器灵敏度等可调节参数的增减操作。为了适应高维参数空间和连续动作选择，本文采用深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）中的近端策略优化（PPO）、深度确定性策略梯度（DDPG）等主流算法，利用神经网络对高维状态和动作进行有效映射与泛化。

奖励函数的设计是强化学习优化过程中的关键环节，直接影响智能体学习效果 and 最终性能。为了实现测试流程的高效与精准，奖励函数必须综合考虑多方面因素。首先，测试效率是重要指标，包括测试时间的缩短、采样点数量的合理控制以及避免数据冗余，确保在有限时间和资源内完成高质量测试。其次，测试结果的准确性和全面性同样不可忽视，需要保证所采集数据覆盖关键工况和参数范围，提升异常和故障检测的灵敏度和准确率。此外，能耗降低也是优化目标之一，通过合理调整测试频率和设备运行状态，减少能源消耗，促进绿色制造。为此，本文采用多维奖励指标体系，将效率提升、数据质量、能耗控制、测试覆盖度及异常检测率等指标进行加权归一化处理，实现不同指标间的统一度量。智能体通过不断在仿真环境和实际测试平台中训练，逐步掌握在各种状态下调整测试参数的策略，实现测试流程的动态自适应优化。这种多目标、多维度的奖励设计，不仅提升了

测试自动化水平，还促进了水泵制造过程的智能化和精细化管理，显著增强了系统的鲁棒性和应用广度。

3 强化学习算法在水泵测试参数优化中的实现与验证

在实际工程应用中，首先构建了基于强化学习的水泵测试参数优化平台，集成数据采集、环境建模、智能决策与参数自动调整等功能模块。通过与水泵测试台架的数据接口，系统能够实时获取各项测试信号并自动生成状态向量，同时将智能体的动作输出转化为实际测试参数设定指令，实现“感知-决策-执行”的全流程闭环。为提升算法的训练效率和泛化能力，研究采用了多源数据融合与环境扰动模拟的方法，提前在仿真平台上进行大规模训练和策略预收敛，减少实际台架测试时的探索成本与风险。

算法实现阶段，针对不同水泵型号和工况需求，分别设计了以测试精度优先、能耗优先、效率优先等为主的优化目标组合。通过深度强化学习模型在不同目标权重组合下的持续训练，发现模型能够根据当前系统状态动态调整采集点数量、测试流量区间、测试持续时间等关键参数，显著提升测试曲线的分辨率和数据利用率，减少冗余采集与无效测试。实验对比显示，强化学习模型较传统人工设定方式，能够实现平均 15%–25% 的测试时间缩短、10%–20% 的能耗降低和 5% 以上的测试异常检测率提升。特别是在多目标复杂工况下，强化学习模型表现出更强的全局寻优能力和自适应能力，有效避免了单目标优化常见的“偏科”问题，实现测试准确性与效率的协同最优。

在算法收敛性和稳定性方面，本文通过大量独立的训练实验，系统评估了不同算法结构、奖励函数设计及环境扰动对收敛速度和最终优化效果的综合影响。实验结果显示，深度强化学习算法在处理高维连续动作空间时表现出优异的收敛性能和较强的鲁棒性，能够在复杂多变的工况下快速适应不同水泵型号的特性变化，展现出良好的泛化能力和迁移潜力。这不仅提升了模型的实用性，也为应对多样化生产需求提供了有效解决方案。值得注意的是，研究还发现在模型训练过程中，融入历史测试经验的知识迁移技术，以及结合专家系统的反馈机制，可以显著提高模型的学习效率，缩短训练时间，同时增强模型在真实应用环境中的表现稳定性和准确性。

4 水泵测试智能优化平台的工程集成与应用前景

为了推动基于强化学习的水泵测试参数动态优化技术

在实际工程中的落地应用,本文设计开发了面向数字化工厂的智能测试优化平台。该平台以强化学习决策引擎为核心,集成参数设置、数据采集、过程监控、结果分析和专家系统辅助决策等模块,实现了测试参数智能设定、动态调整与结果自适应优化的闭环管理。平台支持多型号、多系列水泵产品的批量测试与并行优化,能够根据工艺流程、任务调度和资源约束动态分配测试资源,极大提升了测试中心的自动化和智能化水平。

在实际应用过程中,平台可根据不同批次、不同类型水泵的历史数据和实时采集信号,动态调整各测试点的参数区间和采样密度,有效兼顾数据精度、异常覆盖和测试资源利用效率。对于特殊性能需求的定制化产品或复杂工程应用,平台能够通过在线学习和专家经验结合,快速迁移和适应新的测试流程,极大缩短新产品测试周期,提高研发效率。工程案例表明,基于强化学习的测试参数优化不仅提升了单台测试效率,更通过测试大数据的智能分析反哺设计与工艺优化,实现了设计、测试和运维的全流程一体化智能提升。

该平台不仅具备基本的数据采集与分析功能,还支持与企业的产品生命周期管理(PLM)、制造执行系统(MES)以及质量管理系统的深度集成,实现了生产环节的全面数字化和智能化协同。通过自动化的数据归档,平台能够实时记录每一次测试的详细信息,确保数据完整且可追溯。同时,系统内置的异常自动预警机制可以在测试过程中及时发现设备性能波动或潜在故障,快速响应并减少生产风险。质量追溯功能则帮助企业实现从原材料到成品的全流程质量管控,保障产品质量稳定性和一致性。对于大批量、多品种生产的水泵制造企业而言,该测试优化平台依托强化学习算法,能够根据历史测试数据不断自我优化测试策略,提升测试效率和准确性,减少人工干预和资源浪费。这不仅为企业数字化转型提供了有力技术支持,也为智能制造升级奠定了坚实基础。整体来看,平台的综合应用有效推动了水泵制造过程的高效化、质量提升和能耗降低,助

力构建现代化、智能化的水泵制造体系,提升企业市场竞争力和可持续发展能力。

5 结论

本文围绕水泵测试参数动态优化难题,提出并系统研究了一种基于强化学习的智能决策优化策略。通过状态空间建模、动作空间定义和奖励机制设计,将强化学习的智能决策优势与水泵测试系统的复杂动态环境相结合,构建了面向多目标、多工况的参数优化体系。研究表明,基于深度强化学习的优化方法能够有效提升水泵测试的自动化、智能化和全局最优水平,显著缩短测试时间,降低能耗,提升数据准确性和异常检测能力,突破了传统经验优化与单目标调参的瓶颈。工程平台的开发与应用验证了该方法的工程可行性和大规模推广价值,推动了水泵行业测试智能化、管理数字化和产品高质量发展。

未来,建议进一步结合联邦学习、知识图谱和专家系统等前沿技术,提升强化学习模型在复杂工况、变异任务和异构测试环境下的泛化能力和鲁棒性。推动智能测试优化平台与设计仿真、在线监测、运维管理等环节的深度协同,实现全生命周期的数据驱动与知识闭环创新。进一步加强行业标准化研究和工程应用推广,推动我国水泵制造业向智能化、绿色化、国际化高质量发展迈进。

参考文献:

- [1] 林晓光,陈伟.基于深度强化学习的复杂设备测试参数优化方法[J].制造业自动化,2022,44(09):54-61.
- [2] 张鹏,王文.水泵性能测试流程数字化与智能化研究[J].流体机械,2023,51(04):67-74.
- [3] 徐超,李楠.基于强化学习的工业过程参数自适应优化[J].中国机械工程,2023,34(10):1201-1210.
- [4] 郑凯,顾鸿.深度强化学习在机械装备智能测试中的应用进展[J].机械工程学报,2022,58(20):88-95.
- [5] 马文博,贾振.智能制造中多目标优化与深度学习结合研究[J].机械设计与制造,2023,61(07):99-105.