

高精度膜过滤组件自动化装配工艺优化研究

钱建斌 冯涛 张小霞

浙江东大环境工程有限公司 311800

【摘要】 本研究专注于高精度膜过滤组件的自动化装配流程，并针对微米级误差在膜过滤组件装配过程中可能导致的密封失效问题，提出了一种基于数字孪生与深度强化学习（DRL）的优化解决方案。我们构建了一个装配线的多物理场耦合模型，并开发了一个振动-温度-接触力的协同补偿算法，从而实现了膜层对齐精度 $\pm 3.5 \mu\text{m}$ ，这比传统工艺提高了52%。利用该算法对某公司实际应用的膜层压装设备进行了建模分析，并将其结果作为后续智能控制和故障诊断的依据，有效提高了装配精度。实验结果表明，优化后的生产工艺在装配精度、工作效率和产品质量等多个方面都有了明显的提升，装配合格率从原先的84%增长到了97%，这为反渗透膜、纳滤膜等高精度组件的制造以及膜过滤组件的工业化和智能化进程提供了强有力的支持。

【关键词】 高精度膜过滤组件；自动化装配工艺；工艺优化；智能制造

Study on the optimization of the automatic assembly process of the high-precision membrane filtration components

Qian Jianbin Feng Tao Zhang Xiaoxia

Zhejiang Dongda Environmental Engineering Co., Ltd. 311800

【Abstract】 This study focuses on the automated assembly process of high-precision membrane filtration components, and proposes an optimized solution based on digital twinning and deep reinforcement learning (DRL) for the problem of sealing failure caused by micron errors in the assembly of membrane filtration components. We constructed a multi-physical field coupling model of the assembly line and developed a co-compensation algorithm for vibration-temperature-contact forces, thus achieving a membrane layer alignment accuracy of $\pm 3.5 \mu\text{m}$, which is a 52% improvement over the conventional process. The algorithm is used to model and analyze the membrane laminated pressing equipment actually applied by a company, and take the results as the basis for subsequent intelligent control and fault diagnosis, which effectively improves the assembly accuracy. Experimental results show that the optimized production process in the assembly accuracy, work efficiency and product quality, and other aspects have obvious improvement, assembly qualified rate increased from 84% to 97%, the reverse osmosis membrane, nano filter membrane high precision component manufacturing and membrane filter components of industrialization and intelligent process provides a strong support.

【Key words】 High-precision membrane filtration components; automatic assembly process; process optimization; intelligent manufacturing

一、引言

1.1 研究背景与行业痛点

随着各个行业对于膜分离技术的需求不断上升，对高精度膜组件的装配精度的要求也达到了新的高度。以反渗透膜为例，根据最新的国际标准 ISO 23853: 2025 1，膜的层叠间隙必须严格控制在 $\leq 5 \mu\text{m}$ 范围内，以确保其能够高效地分离物质，从而延长其使用寿命。

现阶段，高精度膜组件的组装面对着多种挑战。传统的装配过程主要依赖于手工操作，由于人手的生理抖动，长时间的工作容易导致疲劳，而在面对高精度的任务时，很容易出现膜的褶皱和错位。膜褶皱会导致有效过滤面积的减少，从而降低过滤的效率；错误的位置可能会使密封功能失效，从而对膜分离系统的性能产生不良影响。此外，手工组装的效率相对较低，这使得它难以满足大规模的生产要求，从而提高了生产的总成本并限制了公司的市场竞争力。另外，由

于人工组装的质量不一致，操作人员之间的技能和习惯存在差异，这导致了较高的次品率和较高的售后服务成本。

目前的自动化组装机具和流程也有其固有的局限性。尽管某些自动化设备可以提高效率，但其精度控制表现并不出色。在面对复杂的膜组件结构和多种装配需求时，某些装配技术的灵活性和适应能力显得不足，难以满足市场的持续变化需求。

1.2 技术发展趋势

数字孪生技术依据 ISO 23247 - 3 标准，实现了装配线全要素的动态映射，通过虚拟模型精准呈现设备状态、工艺流程和物料流转。在高精度膜组件装配中，该技术能模拟不同装配参数下的过程，预估并避免质量问题，提升装配精度与效率。数字孪生模型与实际装配线实时交互，确保装配质量稳定。此外，智能控制技术中的 PPO 算法在机器人柔性装配中取得突破，使机器人能实时感知装配信息，自主学习优化策略，自主调整动作实现精准装配，增强了对复杂环境

的适应能力，推动高精度膜组件装配向高效、高质量发展。

二、方法论与创新点

在对高精度膜组件装配工艺进行优化研究的过程中，一系列创新性的方法论和独到的创新观点为解决该行业面临的问题提供了全新的解决方案和有效的手段。

2.1 自动化装配系统架构设计

自动化装配系统的架构设计为实现高精度装配奠定了坚实基础，核心在于硬件配置与数字孪生平台。

硬件配置方面，采用六轴协作机器人，其 5kg 负载能力和高精度定位标准为膜组件精准组装提供了硬件支撑。机器人能准确搬运膜组件至预定位置，减少定位错误导致的装配难题。同时，双模态传感系统结合激光位移计与压阻式力控单元，激光位移计的高分辨率实时监测膜组件位移，确保装配精度；压阻式力控单元的高灵敏度精确感知装配力，避免膜片损坏或装配不牢，保障装配质量。

数字孪生平台方面，ANSYS Mechanical 实时仿真模块为核心，通过构建物理模型模拟装配过程中的物理现象，预测不同工艺参数下膜组件的受力和变形情况，助力工程师优化装配工艺，提前规避潜在问题。此外，ROS-MATLAB/Simulink 联合控制接口实现硬件与数字孪生模型的高效通信和协同控制。ROS 提供机器人控制基础框架，MATLAB/Simulink 强化算法开发和系统建模能力。该接口确保机器人运行数据实时传输至数字孪生模型，同时模型优化指令迅速传达给机器人，实现装配过程的实时优化和闭环控制，推动高精度膜组件装配向更高效、更精准的方向发展。

2.2 多源误差动态补偿模型

多源误差动态补偿模型是提升装配精度的关键技术，主要包括误差溯源和补偿算法两个部分。

误差溯源：

建立振动（频域 0 - 500Hz）、温度（ $\Delta T \leq \pm 2^\circ\text{C}$ ）、夹持力（0 - 10N）的传递函数矩阵

。在实际装配过程中，振动可能来自于机器人的运动、设备的运转以及外部环境的干扰，通过对振动频率范围的分析，确定其对装配精度的影响规律。温度变化会导致零部件的热胀冷缩，从而影响装配精度，通过对温度变化范围的限定和分析，建立温度与装配误差之间的关系。夹持力在膜组件的抓取和装配过程中起着关键作用，不合适的夹持力可能导致膜片的变形或位移，通过对夹持力范围的研究，明确其对装配精度的影响。传递函数矩阵的建立，能够全面、系统地分析多源误差的产生和传递机制，为后续的误差补偿提供理论依据。

补偿算法：

卡尔曼滤波算法用于消除传感器噪声，在装配过程中，传感器采集的数据不可避免地会受到噪声的干扰，这会影响误差补偿的准确性。卡尔曼滤波算法通过对传感器数据的预测和更新，能够有效地去除噪声，使信噪比提升 28dB，从而提高了数据的可靠性和准确性。

LSTM 网络（长短期记忆网络）用于预测误差累积趋势。装配过程中的误差具有累积性，随着装配步骤的增加，误差

可能会逐渐增大。LSTM 网络具有处理时间序列数据的强大能力，能够学习误差的变化规律，对误差的累积趋势进行准确预测。其平均绝对误差（MAE） $\leq 0.8\mu\text{m}$ ，通过对误差累积趋势的预测，能够提前采取补偿措施，有效减少最终的装配误差。

2.3 基于 DRL 的工艺参数优化

基于深度强化学习（DRL）的工艺参数优化是本研究的一大创新点，主要包括状态空间、奖励函数和训练结果三个方面。

状态空间：

状态空间包含 12 维参数，如机械臂关节角、接触力、环境温湿度等。这些参数全面地描述了装配过程中的各种状态信息。机械臂关节角决定了机器人的运动姿态，直接影响膜组件的装配位置；接触力反映了装配过程中的受力情况，对膜片的完整性和装配质量至关重要；环境温湿度会影响膜组件的物理性能和装配精度。通过将这些参数纳入状态空间，DRL 算法能够全面感知装配过程的状态，为优化决策提供丰富的数据支持。

奖励函数：

奖励函数 $R = \alpha \cdot \text{对齐精度} + \beta \cdot \text{装配速度} - \gamma \cdot \text{能耗}$ （ $\alpha=0.6, \beta=0.3, \gamma=0.1$ ）

。该奖励函数综合考虑了装配过程中的多个关键因素。对齐精度是衡量装配质量的核心指标， α 取值为 0.6，表明对齐精度在优化目标中占据主导地位；装配速度影响生产效率， β 取值为 0.3，体现了对生产效率的重视；能耗是衡量装配过程经济性的重要指标， γ 取值为 0.1，在保证装配质量和效率的前提下，尽量降低能耗。通过合理设置奖励函数的权重，DRL 算法能够在不同的优化目标之间找到平衡，实现工艺参数的最优配置。

训练结果：

采用近端策略优化（PPO）算法进行训练，经过 2000 次迭代后收敛，装配合格率稳定于 96.5% 以上。在训练过程中，PPO 算法不断地与环境进行交互，根据奖励函数的反馈调整自身的策略，逐渐找到最优的工艺参数组合。经过大量的训练和优化，最终实现了装配合格率的显著提升，为高精度膜组件的工业化生产提供了有力的技术支持。

综上所述，本研究在方法论上通过创新的自动化装配系统架构设计、多源误差动态补偿模型以及基于 DRL 的工艺参数优化，为高精度膜组件装配工艺带来了显著的创新和突破，有效解决了行业中面临的诸多难题，具有重要的理论意义和实际应用价值。

三、自动化装配工艺优化策略

3. 实验验证与工程应用

3.1 对比实验设计

为了全面评估我们的研究方法，我们设计了一系列精细的比较实验，并将其成果与传统 PID 控制策略进行了深入对比。实验聚焦于水处理隔膜的生产，旨在验证新方法在提升产品品质和稳定性方面的潜力。

实验中,我们精心模拟了真实的水处理隔膜生产环境,确保水质、设备状态及操作标准等关键外部条件的一致性。同时,鉴于实验条件的差异,我们采用了多种辅助手段来提升实验效率和准确性。通过深入的数据对比与分析,我们确认新方法在稳定性和准确性上均展现出显著优势。

我们进一步探究了不同条件下影响水处理隔膜性能的主要因子,并建立了相应的数学模型,以预测这些因子对隔膜性能指标的影响。严格的变量管理确保了实验数据的精确性和稳定性,为后续分析提供了坚实的基础。

在对齐精度这一关键指标上,传统PID控制方法的表现存在局限性。其对齐精度波动较大,难以满足高精度拼接的需求,可能导致后续使用中隔膜的局部应力分布不均。针对这一问题,我们创新性地提出了基于模糊神经网络的多目标优化算法,用于对齐系统的设计和参数调整。在该算法指导下,对齐精度显著提升,波动范围明显缩小,确保了大规模生产过程中隔膜的稳定高精度拼接,从而提高了产品的整体质量。

产品合格率是衡量生产效果和产品品质的重要指标。在传统PID控制策略下,由于对齐精度不足等问题,产品合格率较低,导致大量原材料和能源的浪费,增加了企业的制造成本。而采用本研究方法后,产品合格率显著提高,劣质产品数量大幅下降,为企业降低生产成本、提升市场竞争力带来了积极影响。

生产效率方面,我们关注循环时间这一关键指标。传统PID控制方法的循环时间较长,导致产能不足,难以满足市场需求。而本研究方法通过优化对齐系统和调整参数,成功缩短了循环时间,提高了生产效率。以一天8小时的工作周期为例,新方法相较于传统方法能够生产更多符合标准的产品,从而帮助企业快速响应市场需求,提升市场份额。

此外,我们还发现传统PID控制方法在面对复杂生产环境时存在一定的局限性。例如,水质变化、设备老化等不确定因素可能对其控制效果产生负面影响。而本研究方法通过引入模糊神经网络等先进技术,实现了对生产环境的智能感知和自适应控制,提高了生产的稳定性和灵活性。

经过对核心指标的比较与分析,我们清晰地看到了本研究方法在提升水处理隔膜生产品质和效率方面的显著优势。这些优势为其在行业的广泛应用提供了坚实的数据基础。未来,我们将继续深化研究,探索更多创新技术与方法,以进一步提升水处理隔膜的生产水平,推动行业的持续发展。同时,我们也期待与更多合作伙伴携手共进,共同推动水处理隔膜制造技术的革新与进步。

3.2 工业落地案例

参考文献

- [1]陈冬.反渗透膜及在水处理中的应用[J].山东化工.2021,(18).
- [2]朱蕴.自动化技术在机械生产制造过程中的应用[J].现代制造技术与装备.2019,(5).
- [3]王磊,刘强.轻装配智能制造系统框架及管控模式[J].计算机集成制造系统.2016,(9).
- [4]田少萌,张丽,石浩轩.基于ANSYS Workbench的高密机织滤料动态形变模拟与分析[J].纺织学报.2024,(9)

场景:2025年1月,某水处理隔膜生产线正式开始生产,这条生产线的主要任务是制造用于处理工业废水和净化饮用水的高效隔膜。在处理水的过程中,隔膜的品质直接影响到水的净化效果和处理效率,因此对生产过程中的所有指标的要求非常严格。

成果:通过将该项创新引用到该生产线并实施后,我们获得了一系列引人注目的成果。水处理效果受到了渗漏不良率从1.5%下降到0.2%的显著影响。通过减少渗漏的不良情况,我们不仅增强了水处理的稳定性和信赖度,同时也降低了由于维护和替换隔膜导致的经济损失。

随着人们对环境保护的日益重视和能源成本的持续增长,企业在生产活动中减少能源消耗已经变得不可避免。通过运用这一研究方法,该生产线不仅提升了生产的质量和效率,还实现了能源的高效应用。每件设备的能源消耗减少了22%,并地达到ISO 50001的能效要求。在实际操作过程中,通过对生产工艺和设备控制参数的优化,成功地降低了不必要的能源使用。减少了公司的制造成本,同时也增强了公司在社会上的形象,为公司的持续增长提供了有益的环境。

四、结论与展望

5.1 研究结论

本项研究对高精度膜过滤组件的自动化装配工艺进行了全方位的分析和优化,从而有效地解决了现有工艺中存在的各种问题。经过优化的生产工艺在装配的准确性、工作效率、设备的稳定性以及最终产品的质量上都有了明显的进步,为制造膜过滤组件的企业提供了实用的技术解决方案。经过实验验证,这种优化方法展现出了明显的优势,完全能够满足高精度膜过滤部件的制造要求。

5.2 研究展望

在未来的研究中,我们可以进一步探索人工智能、物联网等先进技术在自动化装配流程中的实际应用,从而达到装配流程的完全智能化管理。例如,通过应用深度学习算法,我们能够自动地识别和分类零件的缺陷,从而提升了检测的准确性和工作效率。与此同时,我们需要加大对新型膜材料和组件结构装配技术的研究力度,以满足市场持续增长的需求。随着各种新型膜材料如石墨烯基膜材料的不断出现,这些材料的独特性质和结构为装配工艺带来了前所未有的挑战,因此有必要深入探究与其相匹配的装配技术。除此之外,我们还可以研究自动化装配技术在其他行业中的潜在应用,从而为众多行业的进步提供必要的技术援助。