

基于GWO-BP的晶圆机器人手臂疲劳寿命研究

王公浩然, 纪玉杰*

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年11月15日; 录用日期: 2025年12月8日; 发布日期: 2025年12月15日

摘要

晶圆机器人的大臂以神经网络算法为理论进行疲劳寿命研究, 然而, 该算法有着容易陷入局部最优且容易过拟合的问题, 本文针对这一问题, 提出一种基于灰狼算法优化的神经网络预测寿命方法, 可以解决神经网络的上述缺点。首先通过有限元分析, 利用ANSYS软件对其大臂进行仿真, 借助nCode软件开展疲劳寿命预测, 得出具体的寿命结果。最后, 利用灰狼算法优化的BP神经网络方法预测大臂寿命。结果显示, 经训练测试后该方法的预测精度可达98.70%, 为晶圆机器人手臂的设计优化提供了理论支持, 并对类似机械结构的疲劳寿命研究有参考价值。

关键词

晶圆机器人, 大臂, 有限元分析, BP神经网络算法, 灰狼算法

Research on Fatigue Life of Wafer Robot's Large Arm Based on GWO-BP

Gonghaoran Wang, Yujie Ji*

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: November 15, 2025; accepted: December 8, 2025; published: December 15, 2025

Abstract

The large arm of the wafer robot is studied for fatigue life based on neural network algorithms. However, this algorithm is prone to getting trapped in local optima and overfitting. To address this issue, this paper proposes a neural network life prediction method optimized by the gray wolf algorithm, which can overcome the aforementioned drawbacks of neural networks. First, finite element analysis is conducted, and the large arm is simulated using ANSYS software, while fatigue life prediction is performed with the help of nCode software to obtain specific life results. Finally, the gray wolf algorithm-

*通讯作者。

文章引用: 王公浩然, 纪玉杰. 基于 GWO-BP 的晶圆机器人手臂疲劳寿命研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(12): 53-64.
DOI: 10.12677/mos.2025.1412658

optimized BP neural network method is used to predict the large arm's life. The results show that after training and testing, the prediction accuracy of this method reaches 98.70%, providing theoretical support for the design optimization of the wafer robot's large arm and offering valuable reference for fatigue life research of similar mechanical structures.

Keywords

Wafer Robot, Large Arm, Finite Element Analysis, BP Neural Network Algorithm, Grey Wolf Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在芯片制造业中, 晶圆机器人零部件的疲劳问题直接影响设备的使用寿命和稳定性。作为引起工程结构失效的重要原因之一, 疲劳寿命预测在工程领域起到了至关重要的作用, 其准确性直接关系到产品安全性、可靠性和经济性[1]-[4]。而晶圆机器人的工作性能直接影响晶圆制造质量和生产效率[5], 其使用寿命对企业成本和可靠性至关重要。因此, 对晶圆机器人大臂的疲劳寿命进行准确预测具有重要的研究意义。

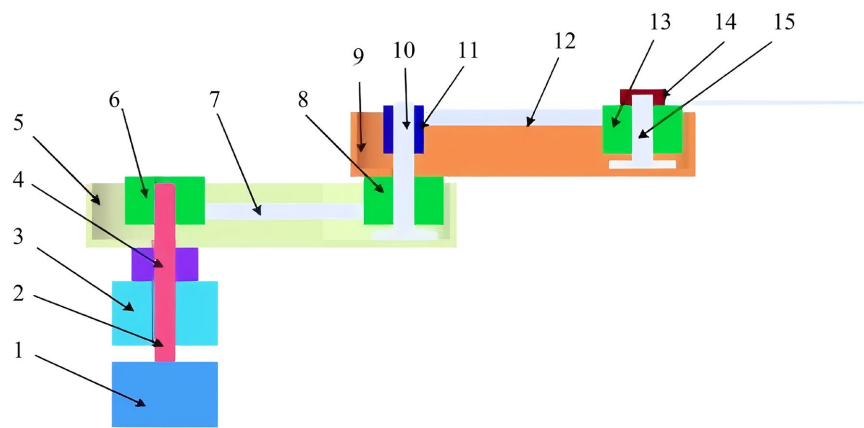
近年来, 机器学习方法已成为当今发展最快的技术领域之一, 是人工智能和数据科学的核心[6]。机器学习通过考虑复杂影响和降低计算成本, 有效地解决结构的寿命预测问题, 并且已被证明足以捕捉数据中的潜在关系, 即使相应的物理基本定律是模糊或未知的[7]。研究人员已经将机器学习方法应用于疲劳相关领域[8]-[10], 显示出机器学习方法在疲劳相关领域的潜力。反向传播神经网络(Backpropagation neural network, BP)因其良好的拟合非线性映射的能力被广泛应用于寿命预测领域。Gao 等[10]为了解决传统的多轴疲劳寿命预测模型是经验或半经验的问题, 提出了一种数据驱动的方法, 该方法结合了反向传播神经网络和高斯过程回归, 所得预测的寿命都在 ± 3 的寿命因子范围内。在研究中, BP神经网络的阈值和权重值的原始生成存在不确定性将产生BP神经网络容易陷入局部最优的风险。因此, 为了克服BP算法容易陷入局部极小值的缺点, 选择引入灰狼算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)来搜索BP网络的初始权重值和阈值。该算法凭借其结构简洁性、低参数依赖性等特征, 在电力系统调度、组合投资决策及深度神经网络训练等跨领域复杂优化场景中展现出全局寻优能力, 因而受到学界与工业界的持续关注[11]。例如, 文献[12]针对高原环境柴油机工作恶化的问题, 利用灰狼算法对柴油机可调增压参数和喷油参数进行协同优化, 获取不同转速下的最优数值。

综上所述, 本研究将基于GWO-BP方法, 对晶圆机器人大臂的疲劳寿命展开深入研究, 通过动力学分析[13] [14]、有限元分析[15]和神经网络预测[16]等方法, 为其未来可能的设计优化和可靠性提升提供理论支持。

2. 晶圆机器人的结构与运动分析

晶圆机器人通常由多个连杆和关节组成, 其结构设计旨在实现高效、精确的晶圆搬运任务。如图1所示, 大臂电机驱动套轴旋转, 套轴经螺栓与大臂相连, 大臂电机的动力经传递后使大臂旋转, 进而实现机器人在水平方向的转动。小臂电机带动小臂旋转, 小臂电机的旋转角度与小臂旋转角度相同。从末端

执行器的传动方案来看，钢带轮 3 经螺栓与大臂连接，大臂又与大臂以螺栓相连，当小臂旋转时，钢带轮 3 保持静止。



注：1：小臂电机；2：轴；3：电机；4：套轴；5：大臂；6：钢带轮 1；7：钢带；8：钢带轮；9：小臂；10：大臂；11：钢带轮 3；12：钢带；13：钢带轮 4；14：执行器；15：腕轴。

Figure 1. Cross-sectional view of the wafer handling robot
图 1. 晶圆搬运机器人剖视图

3. 大臂的有限元分析与疲劳寿命预测

3.1. 大臂结构与材料参数

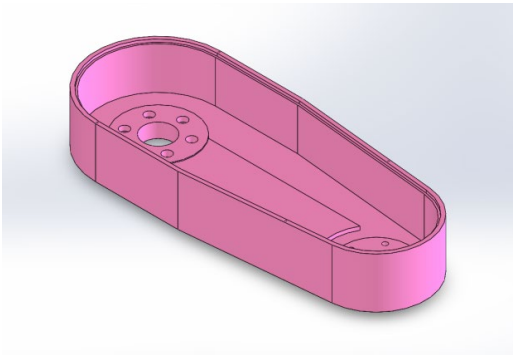


Figure 2. 3D model of the large arm
图 2. 大臂三维模型

Table 1. Alloy steel material parameters
表 1. 合金钢材料参数

材料参数	合金钢
密度/(kg·m ⁻³)	7700
杨氏模量/MPa	202,240
泊松比	0.28
弹性模量/MPa	21,000
抗剪模量/MPa	79,000
屈服强度/MPa	620.42
张力强度/MPa	723.83

晶圆机器人手臂三维结构模型如图 2 所示。在实际运行后可知, 该机器人的大臂关节的转角范围为 360° 整周旋转, 小臂关节的转角范围为 $\pm 120^\circ$, 末端关节的转角范围为 $\pm 120^\circ$ 。选取大臂旋转角度为 $\pm 120^\circ$ 、正反旋转的速度为 20 rad/s 作为本次疲劳寿命分析的工况。其所用材料为合金钢, 材料具体参数见表 1。

3.2. 大臂有限元分析

3.2.1. 网格划分

对大臂进行静态结构仿真, 在三维软件 SOLIDWORKS 2022 中建立模型后, 随后导入有限元软件 ANSYS Workbench 中进行受力分析[17][18]。划分网格时, 为提高计算精度, 选取网格分辨率为 7, 选用 Automatic Method 网格划分法, 最终的节点数为 75,080 个, 网格单元数为 45,464 个, 网格模型如图 3 所示。



Figure 3. Finite element mesh model
图 3. 有限元网格模型

3.2.2. 边界条件与载荷设置

为准确模拟大臂在实际工作中的受力状态, 需明确边界条件与载荷谱。边界条件设置如下:

约束位置: 大臂通过螺栓与套轴刚性连接, 由大臂电机驱动进行旋转。因此, 在大臂与套轴的螺栓连接处施加固定约束, 限制所有平移自由度(UX, UY, UZ)和旋转自由度(ROTX, ROTY, ROTZ), 以模拟其与驱动轴的刚性连接状态。该约束位置是力与力矩从驱动源传递到大臂的关键路径。

载荷施加: 根据大臂的运动学参数(旋转角度 $\pm 120^\circ$, 角速度 20 rad/s), 构建完整的载荷谱。在实际工作循环中, 大臂在加速、匀速和减速阶段承受惯性力矩和离心力。载荷谱采用正弦波形模拟周期性旋转载荷, 幅值根据最大角加速度计算得出:

$$M = J \cdot \alpha \quad (1)$$

其中, J 为大臂转动惯量, α 为角加速度。载荷频率为 $f = 1/T$, T 为一个完整运动周期的时间。载荷方向沿大臂旋转平面, 随时间变化反映正反转过程中的受力变化。

大臂旋转运动的最大角速度设定为 $\omega = 20 \text{ rad/s}$ 。假设加速时间为 $t = 0.05 \text{ s}$, 则角加速度 $\alpha = \omega/t = 400 \text{ rad/s}^2$ 。通过 CAD 软件质量属性分析测量, 大臂本体及末端等效负载(执行器与晶圆)对旋转轴的转动惯量之和 J 约为 $0.015 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。基于上述参数, 计算得到作用在大臂上的主要惯性力矩 M 约为 $6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。同时, 由角速度产生的最大离心力 F 作用于负载质心, 其值约为 50。

3.2.3. 求解设置与云图分析

求解计算结束时间为 0.25 s , 当前时间步为 1 步, 其他保持默认设置。在求解过程中, ANSYS 将依

据所设置的约束条件、施加的载荷以及求解参数, 计算出大臂模型的位移、应力、应变等关键结果。求解完成后, 大臂模型的等效应力云图、等效弹性应变云图、等效变形云图如图 4~6 所示。由图 4 可知, 大臂钢带轮连接处的等效应力最大, 为 7.2432 MPa, 该区域因几何形状突变(如螺栓孔边缘、过渡圆角不足)导致应力集中, 属于典型的结构薄弱点。结合结构力学原理, 应力集中主要由截面变化和局部缺口效应引起, 易成为疲劳裂纹萌生位置。由图 5 显示, 最大等效弹性应变为 3.34×10^{-5} mm, 图 6 显示最大变形量为 0.47369 mm, 位于大臂前部。变形分布表明, 结构在动态载荷下刚度分布不均, 前部因悬臂效应变形较大, 进一步验证了应力集中区域的疲劳敏感性。初步使用 ANSYS Mechanical Enterprise 中自带的 Fatigue Tool 对大臂的疲劳寿命进行分析。根据合金钢的疲劳性能曲线和应力谱, 采用 Miner 线性累积损伤理论[19], 计算大臂在循环载荷作用下的疲劳损伤。

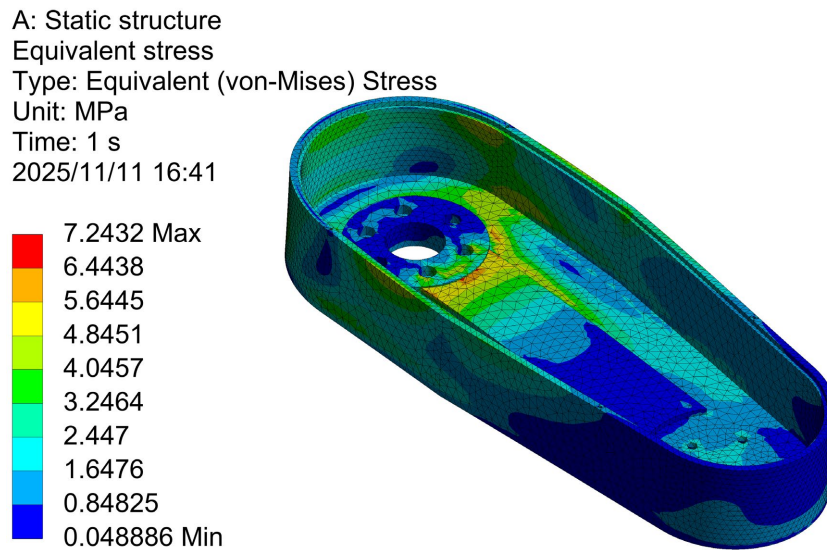


Figure 4. Equivalent stress cloud diagram
图 4. 等效应力云图

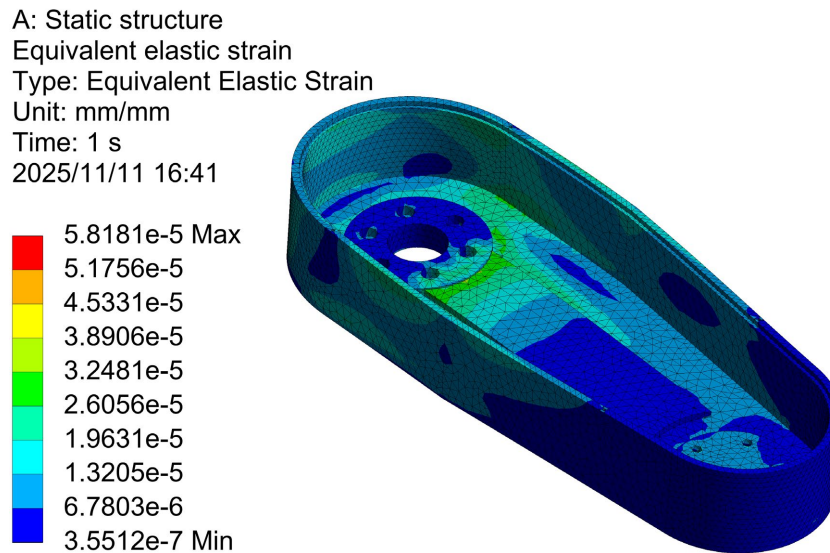


Figure 5. Equivalent resilience cloud diagram
图 5. 等效弹性应变云图

A: Static structure
Total Transformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
2025/11/11 17:11

0.047369 Max
0.042106
0.036842
0.031579
0.026316
0.021053
0.01579
0.010526
0.0052632
0 Min

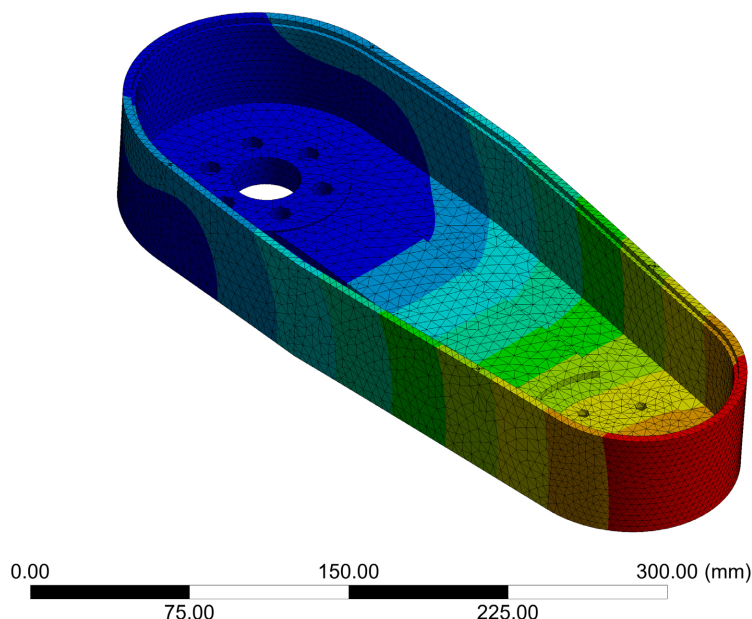


Figure 6. Equivalent deformation cloud diagram
图 6. 等效变形云图

3.3. 基于 nCode 的疲劳寿命分析

3.3.1. 疲劳累积损伤理论

疲劳累积损伤理论是结构寿命预测的核心理论之一，其核心假设认为：材料在循环载荷作用下产生的损伤具有可累加性，且当累积损伤程度达到临界阈值时即发生疲劳失效。该理论最早由 Palmgren 和 Miner 系统提出，形成了经典的线性累积损伤模型，即 Miner 准则[19]。其数学表达式为：

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \leq D_{cr} \quad (2)$$

式中， n_i 为第 i 级应力水平下的实际循环次数， N_i 为对应应力水平的材料破坏循环次数， D_{cr} 为临界损伤和，通常 D_{cr} 取 1.0。该模型将复杂载荷谱简化为离散应力水平的线性叠加，但其忽略载荷顺序效应和损伤的非线性特性。

在传统的疲劳寿命研究中，名义应力法具有数据积累充分、计算简便的特点，尤其适用于承受单轴应力且应力梯度较小的标准结构件。但名义定义法的局限性在于无法准确反映局部塑性变形和多轴应力状态的影响，对于复杂几何结构的寿命预测精度相对较低，寿命估算时需根据载荷类型选用相应的应力比修正方法，如 Goodman 直线法或 Gerber 抛物线法处理平均应力效应。

3.3.2. nCode 疲劳分析

为获得更精确的疲劳寿命数据，以便为未来的优化设计提供参考，通过 nCode 软件的疲劳分析模块，输入相应的参数和载荷数据，以得到大臂的疲劳寿命预测结果[16]。nCode 疲劳分析模块如图 7 所示。

采用 nCode DesignLife 中的时间序列载荷进行疲劳分析，时间序列载荷能够精确模拟结构在实际工作过程中随时间变化的载荷历程，对于研究结构的疲劳行为具有重要意义。载荷波形为正弦波，幅值范

围为-1至1,对应大臂在正反转过程中的最小与最大载荷,图8直观地展示了时间载荷历程的图形表示。频率设置为:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

其中, T 为单次循环时间,基于机器人实际工作节拍(3500~6000 片/小时)换算得出。该载荷谱能有效模拟大臂在连续运行中的交变应力状态,与实际工况中的启动-运行-制动过程高度吻合。

nCode 分析模块设置如图7所示,采用 S-N 曲线和 Goodman 平均应力修正方法,存活率设为 0.5。分析后得到损伤云图(图9)和疲劳寿命云图(图10)。损伤云图中红色区域对应于有限元分析中的高应力区,进一步证实钢带轮连接处为疲劳危险点。寿命云图显示最小疲劳寿命为 6.451×10^{11} 次循环,换算为运行时间约为 5,375,000~9,214,285 小时,满足设计需求。仿真结果显示,最大等效应力(7.2432 MPa)与最小疲劳寿命(6.451×10^{11} 次循环)的位置高度重合,均位于钢带轮与大臂本体的连接区域。结合结构力学原理深入分析可知,大臂的应力集中与疲劳危险点主要出现在钢带轮连接处,其成因主要包括三个方面:首先,该区域存在的螺栓孔、台肩及截面突变等几何不连续性,导致力流线发生急剧偏转与密集,引发显著的缺口效应,造成局部峰值应力;其次,该节点同时承受来自大臂本体的惯性弯矩、扭矩以及钢带轮传递的拉压交变载荷,处于复杂的多轴应力状态,进一步加剧了疲劳损伤;此外,动态启停过程中的载荷激励可能产生动力放大效应,使应力幅值增大,加速疲劳累积。

因此,若要对大臂进行优化,应在几何突变处采用足够大的过渡圆角,贯彻平滑过渡原则以降低应力集中系数;通过在危险区域增设加强筋或局部增厚,改善载荷传递路径,强化局部刚度;对关键部位实施喷丸等表面强化工艺,引入残余压应力,抑制裂纹萌生;并可进一步采用拓扑优化等数字化设计方法,从布局上实现应力分布均匀化与轻量化的平衡,从而系统提升大臂的疲劳寿命与可靠性。

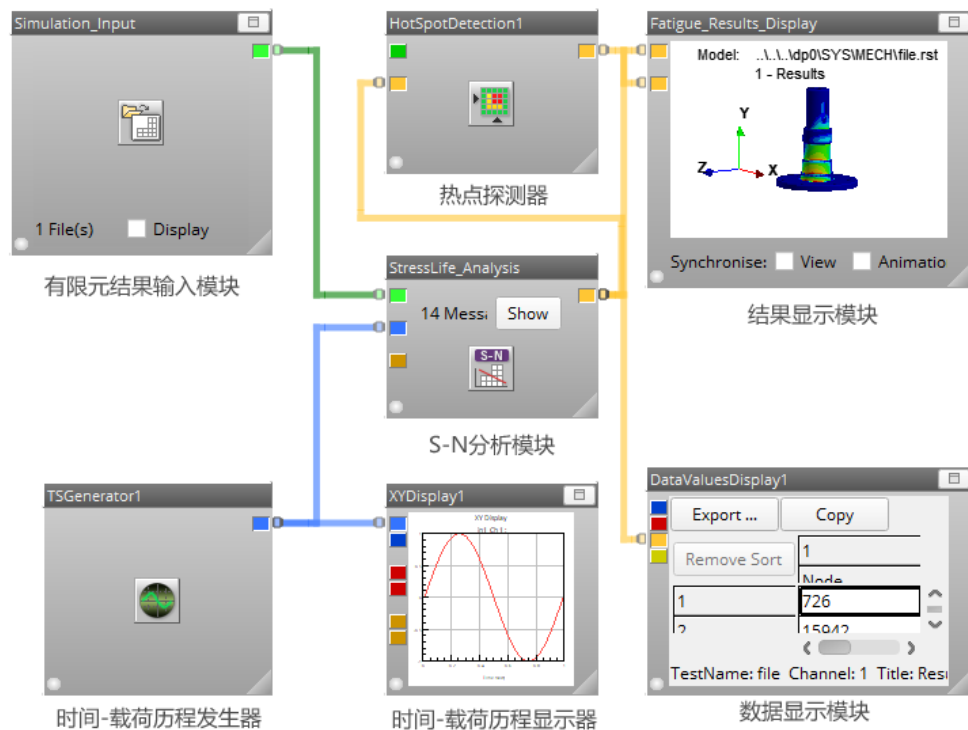


Figure 7. Diagram of the nCode fatigue analysis module
图7. nCode 疲劳分析模块图

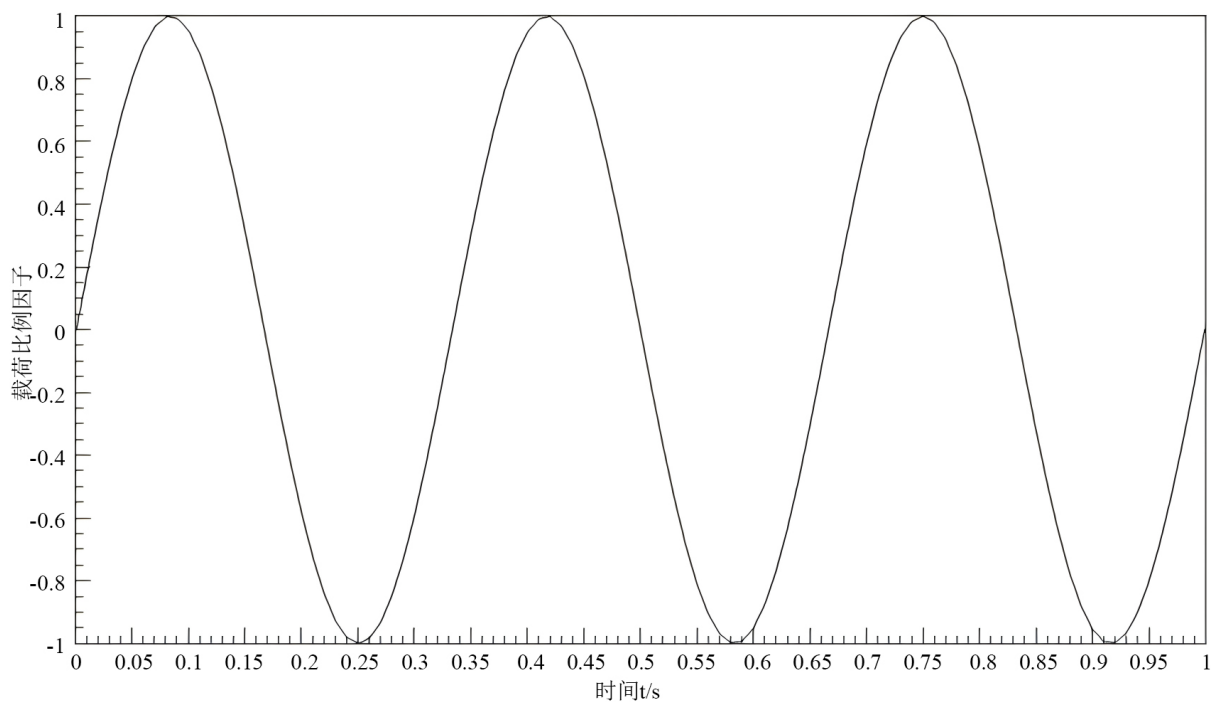


Figure 8. Time load history
图 8. 时间载荷历程

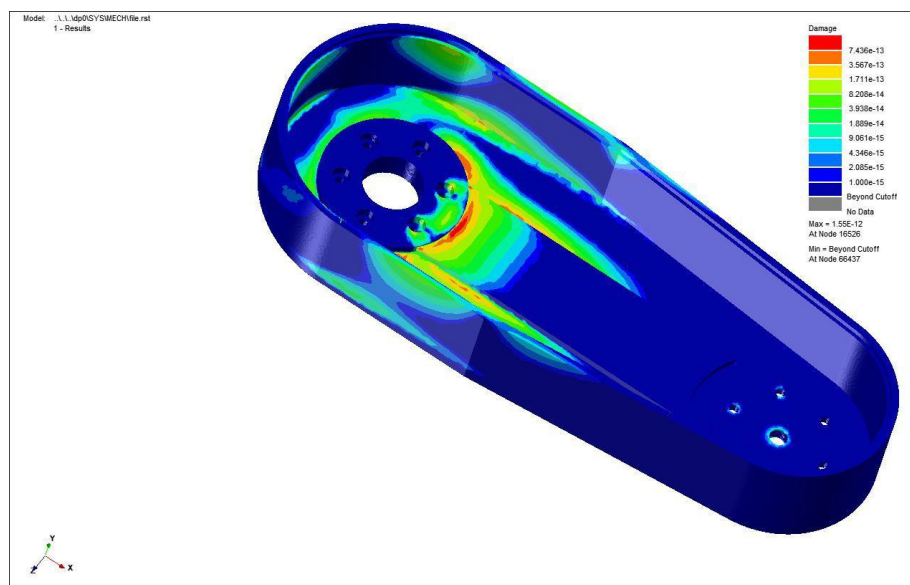


Figure 9. nCode damage cloud map
图 9. nCode 损伤云图

在正常工作条件下, 设计寿命通常在数千小时到数万小时不等。据调研, 国内晶圆机器人输送晶圆的效率为 3500~6000 片/小时, 输送一片晶圆则转轴转动 2 次, 因此大臂的运行次数为 7000~12,000 次/小时。如式(4)所示, 可计算出大臂的运行寿命为 5,375,000~9,214,285 小时。

$$T = \frac{N}{n} \quad (4)$$

式中， T 为运行时间， N 为总运行次数， n 为每小时运行次数。

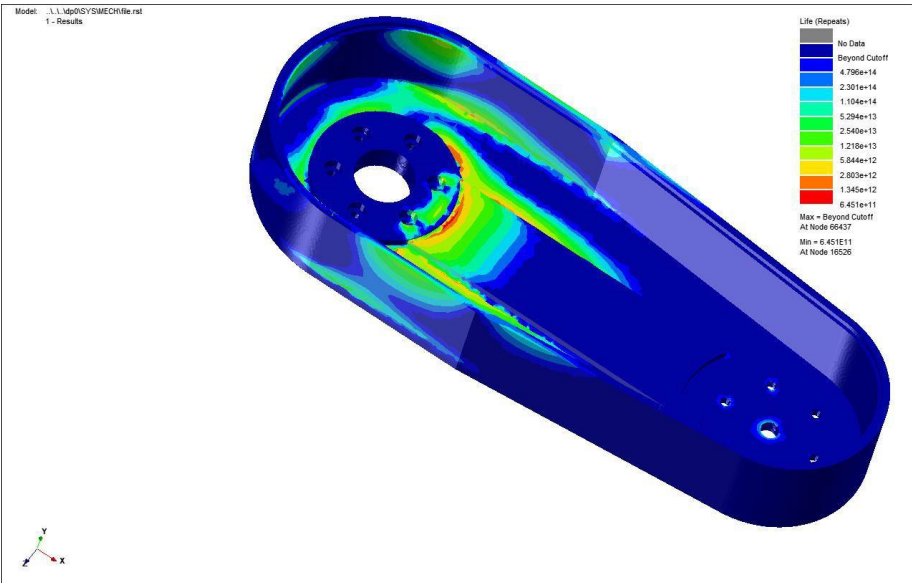


Figure 10. nCode fatigue life cloud map
图 10. nCode 疲劳寿命云图

4. GWO-BP 对疲劳寿命的研究

4.1. 数据收集与预处理

为了研究大臂的寿命，通过 nCode 软件的数据显示模块提取 50 组大臂上寿命较短的数据，又从 Workbench 中导出大臂总变形、等效应力、等效弹性应变的结果，用 Execl 对这些数据进行整理与归一化处理，每一个节点对应三个结果，部分数据如表 2 所示。将随机抽取表 2 中的 40 组数据作为训练集，剩余 10 组作为验证集验证模型的准确性。

Table 2. Large arm life table
表 2. 大臂寿命表

序号	单元	应力/MPa	应变/mm	总形变/mm	寿命/次
1	16,526	6.4509	3.34E-05	7.39E-04	6.45E+11
2	16,519	5.9644	3.09E-05	7.42E-04	7.13E+11
3	19,089	4.9538	2.98E-05	3.03E-04	7.74E+11
4	16,513	5.7749	2.99E-05	7.65E-04	7.78E+11
5	16,534	5.4838	2.95E-05	7.29E-04	7.83E+11
6	16,520	5.8882	3.04E-05	7.67E-04	8.00E+11
7	19,097	4.7756	2.75E-05	3.05E-04	9.01E+11
8	19,291	4.7605	2.63E-05	1.01E-03	9.37E+11
9	16,512	5.6388	2.92E-05	7.74E-04	9.69E+11
10	18,259	4.5504	2.51E-05	1.13E-03	1.02E+12

4.2. BP 神经网络结构设计

如图 11 所示, BP 神经网络采用单输入层、单隐含层和单输出层的结构。在输入层, 选定大臂总变形、等效应力、等效弹性应变作为输入层输入参数, 而隐含层则设置 5 个神经元, 设定最大迭代次数为 500 次。

4.3. 灰狼优化算法优化

BP 神经网络算法流程作为一种通过调整网络参数逼近目标函数的方法, 其需要手动调整学习率、动量参数等参数, 且容易陷入局部最优, 这极大地增加了预测值的不确定性。因此, 采用灰狼优化算法对 BP 神经网络的权重和阈值进行优化。灰狼优化算法作为一种基于群体智能的优化算法, 通过模拟灰狼的社会等级与捕猎行为来实现迭代优化, 具有自适应调整、局部与全局搜索平衡、群体协作机制以及快速收敛等特色优点[20]-[22]。

采用 MATLAB 构建适应度函数, 使用灰狼优化算法优化神经网络的参数, 并通过 R^2 值评估模型性能。在 MATLAB 中, 通过编写代码, 设置灰狼种群大小为 20, 最大迭代次数为 500 次, 设置优化变量的上下限为[-3, 3]。

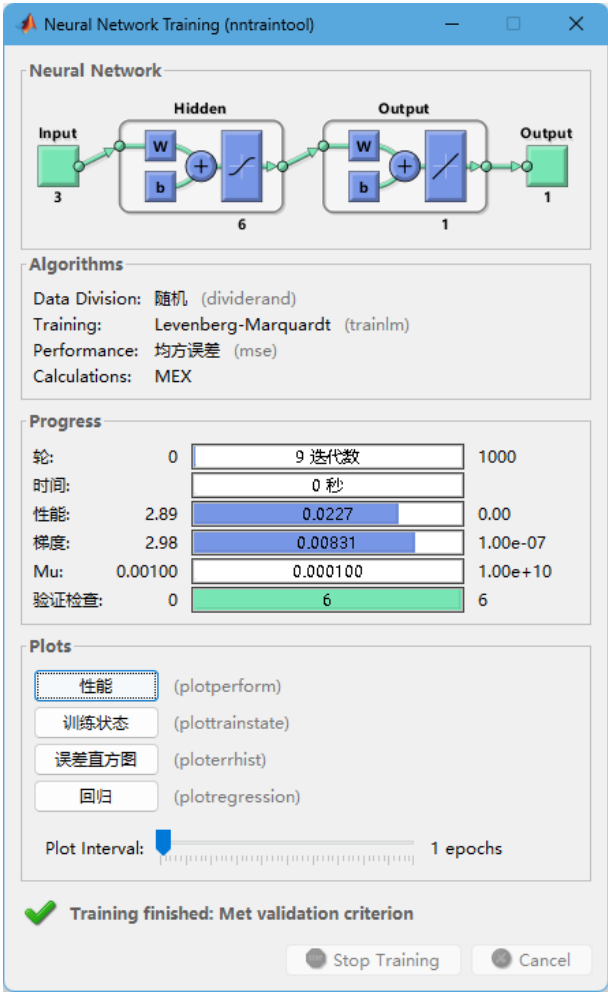


Figure 11. Training process of the large arm life network
图 11. 大臂寿命网络训练过程

将训练集引入优化后的 BP 神经网络模型进行训练,当灰狼优化 BP 神经网络模型迭代到第 78 次时,达到收敛标准, BP 神经网络达到预设精度,这表明,以等效应力、等效弹性应变和总形变作为输入,可有效预测其疲劳寿命。图 12 对比了大臂寿命的实际值与预测值,蓝色实线为实际值,红色虚线为预测值,两者趋势相仿且重合度较高,预测精度 R^2 高达 97.17%,表明该 GWO-BP 模型在大臂寿命预测上性能良好。

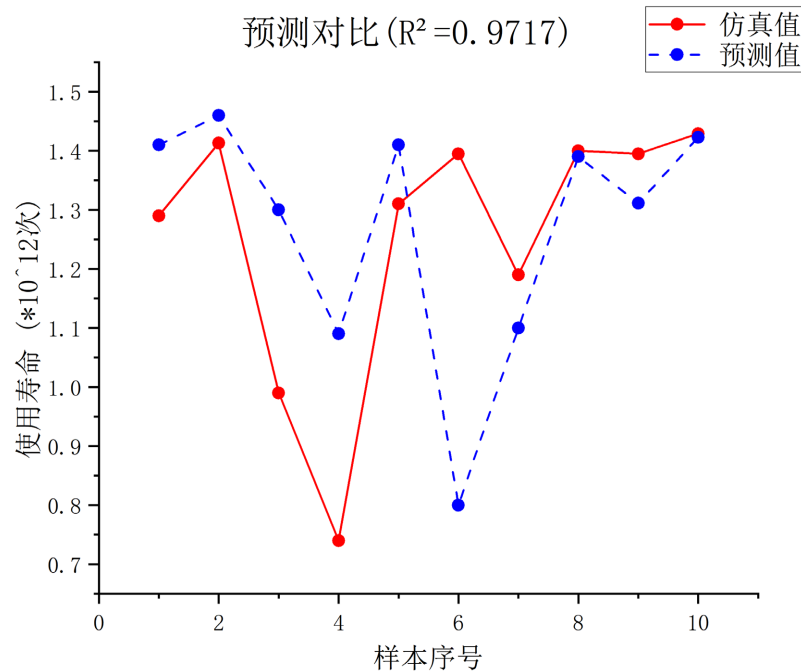


Figure 12. Prediction model simulation results
图 12. 预测模型仿真结果

5. 结论

1) 运用有限元方法对大臂进行了分析,确定了大臂的应力集中区域和疲劳薄弱环节,其中大臂钢带轮连接处的等效应力最大,为 7.2432 MPa;大臂前部的变形最大,为 0.47369 mm。同时,通过 nCode 软件的疲劳寿命预测,得到的大臂运行寿命为 5,375,000~9,214,285 小时,为后续算法求解提供了数据支持,并为实际应用中的维护和更换提供了参考。

2) 提出了 GWO-BP 方法对大臂寿命进行预测,通过训练、迭代和测试,将得到的数据与 nCode 软件数据进行对比,该方法的预测精度可达 97.17%,验证了该方法的有效性和可行性。

基金项目

辽宁省教育厅基本科研项目(JYTQN2023064)。

参考文献

- [1] 李强, 邓熠, 杨伟, 等. 航空发动机用齿轮泵齿轮轴疲劳断裂分析与优化设计[J]. 机床与液压, 2024, 52(8): 208-212.
- [2] 曹蕾蕾, 康凡军, 郭城臣, 等. 变速箱中间轴焊接结构多轴疲劳寿命分析方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(13): 1605-1610.
- [3] 张猛. 随机载荷下转向节多轴高周疲劳寿命研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.

- [4] 李静, 华腾飞, 刘豪, 等. 基于切应变能密度的拉扭双轴疲劳寿命预测模型[J]. 航空动力学报, 2025, 40(5): 59-66.
- [5] 李昱辉, 赵明. 搬运机器人运动规划与硅片校准技术研究[J]. 粘接, 2024, 51(12): 102-104+108.
- [6] 徐自力, 高京京, 覃曼青, 等. 基于混合机器学习模型的两级加载下金属材料的剩余疲劳寿命预测方法[J/OL]. 机械工程学报: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20250409.1400.028.html>, 2025-05-20.
- [7] Farid, M. (2022) Data-Driven Method for Real-Time Prediction and Uncertainty Quantification of Fatigue Failure under Stochastic Loading Using Artificial Neural Networks and Gaussian Process Regression. *International Journal of Fatigue*, **155**, Article ID: 106415. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106415>
- [8] Saraygord Afshari, S., Enayatollahi, F., Xu, X. and Liang, X. (2022) Machine Learning-Based Methods in Structural Reliability Analysis: A Review. *Reliability Engineering & System Safety*, **219**, Article ID: 108223. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108223>
- [9] Chen, J. and Liu, Y. (2022) Fatigue Modeling Using Neural Networks: A Comprehensive Review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **45**, 945-979. <https://doi.org/10.1111/ffe.13640>
- [10] Gao, J., Wang, J., Xu, Z., Wang, C. and Yan, S. (2023) Multiaxial Fatigue Prediction and Uncertainty Quantification Based on Back Propagation Neural Network and Gaussian Process Regression. *International Journal of Fatigue*, **168**, Article ID: 107361. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107361>
- [11] 蒋正锋, 李春青, 杨秀增, 等. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(16): 76-105.
- [12] 田宇, 张付军, 崔涛, 等. 基于灰狼算法的柴油机高海拔油气参数优化[J]. 车用发动机, 2023(6): 54-60.
- [13] 张肄冕, 徐方, 杜振军, 等. 硅片搬运机器人运动学分析及仿真[J]. 机械设计与制造, 2025(1): 307-312.
- [14] 徐有军. 基于改进人工势场法的多自由度机械臂全局轨迹规划[J]. 机械制造, 2025, 63(7): 35-39.
- [15] Cong, M., Wang, T.J. and Zhang, C.S. (2009) A Study of Topology Optimization Design for the Wafer Handling Robot Arm. *Materials Science Forum*, **626**, 471-476. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.626-627.471>
- [16] 都平安. 带式输送机托辊有限元分析及疲劳寿命预测[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [17] 王利娟, 牟宇涵, 凌志强, 等. 基于 ANSYS Workbench 和 nCode 的履带式起重机转台疲劳强度分析[J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(5): 30-31+41.
- [18] 陈科, 彭语堂, 肖祺滨, 等. 岸桥起重机前大梁疲劳寿命的数值模拟分析[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 51-59.
- [19] 杨传猛, 朱梦宇, 邱明, 等. 基于非线性累积损伤理论的轮毂轴承疲劳寿命评估[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(1): 63-68.
- [20] 张旭辉, 汤杜炜, 杨文娟, 等. 基于改进 GWO 算法的掘进机断面成形轨迹规划方法研究[J]. 工程设计学报, 2025, 32(3): 296-307.
- [21] 焦健, 纪元法, 孙希延, 等. 基于改进 GWO 的多无人机三维协同航迹规划[J]. 计算机与现代化, 2024(10): 1-6+13.
- [22] 张宇璇, 张楠. 基于改进灰狼算法的物流机器人运动路径规划方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 276-282.