

基于机器学习的液压摆缸叶片密封性能预测模型

陈华¹, 陈荣², 鲍春波¹

(1. 四川工业科技学院 电子信息与计算机工程学院, 四川 德阳 618500;

2. 四川水利职业技术学院 电力工程学院, 成都 610000)

摘要: 液压摆缸运行时若液压油从叶片与缸体的间隙泄露, 会导致压力下降, 减少输出扭矩, 无法实现预期操作效果; 由此, 提出一种基于机器学习的液压摆缸叶片密封性能预测模型; 采用 Morris 方法计算敏感性指标, 基于断裂力学角度, 采用能量释放模式分析橡胶密封材料疲劳破坏过程, 建立疲劳性函数; 通过敏感性与疲劳性分析密封性能指标, 确立评价标准, 并划分性能等级, 获取液压摆缸叶片密封性能的关键因素; 根据密封磨损失效极限损伤的计算, 确立泄漏率和密封环的热量样本数据; 将泄漏率、密封环热量作为 BP 人工神经网络输入层单元的输入值将性能预测指标作为输出值, 构建液压摆缸性能预测模型; 实验结果表明: 所建模型液压摆缸叶片密封性能预测精度高、效率快, 为相关领域机械设计工作提供可靠参考。

关键词: 机器学习; 液压摆缸; 叶片密封; 性能预测; 模型构建; BP 神经网络

Prediction Model for Sealing Performance of Hydraulic Swing Cylinder Blades Based on Machine Learning

CHEN Hua¹, CHEN Rong², BAO Chunbo¹

(1. School of Electronic Information and Computer Engineering, Sichuan Institute of Industrial Technology, Deyang 618500, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 610000, China)

Abstract: If hydraulic oil leaks from the gap between the blades and the cylinder during the operation of the hydraulic swing cylinder, it will lead to a decrease in pressure, reduce output torque, and fail to achieve the expected operating effect. Therefore, a prediction model for the sealing performance of hydraulic swing cylinder blades based on machine learning is proposed. Morris method is used to calculate the sensitivity index. Based on fracture mechanics, energy release mode is used to analyze the fatigue failure process of rubber sealing materials, and establish the fatigue function. The sealing performance indicators of sensitivity and fatigue are analyzed to establish evaluation standards, divide performance levels, and obtain the key factors for the sealing performance of hydraulic swing cylinder blades. Based on the calculation of seal wear failure limit damage, the leakage rate and heat sample data of the sealing ring is established. leakage rate and sealing ring heat are taken as the input values of BP artificial neural network input layer units, and the performance prediction indicators as the output values, a hydraulic swing cylinder performance prediction model is constructed. The experimental results show that the built model has high prediction accuracy and fast efficiency for the sealing performance of hydraulic swing cylinder blades, it provides a reliable reference for mechanical design work in related fields.

Keywords: machine learning; hydraulic swing cylinder; blade sealing; performance prediction; model construction; BP neural network

0 引言

液压系统在不同工业领域均被广泛使用, 用于传输动力或完成设备自动化操纵控制。叶片式液压摆缸可将液体压力直接转化为往复摆动并输出扭矩, 其具有输出扭矩大、机械效率高等特点^[1]。液压摆缸在各种工业领域中被广泛

应用, 如航空、汽车、机械制造等。随着工业化进程的不断发展, 对机械设备的工作效率和使用寿命要求越来越高。而液压摆缸作为机械设备中的关键元件, 然而, 设计和制造过程中仍然存在一些问题, 如叶片密封性能预测不准确、叶片泄漏等, 其叶片密封性能的好坏直接影响到机械设备的工作效率和使用寿命。在液压摆缸中, 叶片密封性能指

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-05-24。

基金项目: 四川省教育协会课题(MBXH21YB162)。

作者简介: 陈华(1981-), 男, 硕士, 讲师。

陈荣(1981-), 男, 硕士, 副教授。

鲍春波(1956-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 陈华, 陈荣, 鲍春波. 基于机器学习的液压摆缸叶片密封性能预测模型[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 77-82.

的是叶片与摆缸内壁之间的密封程度。由于液压摆缸工作时需要承受高压和高温的环境,如果叶片与摆缸内壁之间的密封不够好,就会导致液体泄漏、机械设备效率下降,甚至可能会危及机械设备的安全运行。在实际操作中,摆缸的密封功能是由多个弹性体组成的复合密封,结构非常复杂,一旦出现操作故障将直接影响液压摆缸的工作性能。叶片密封是摆缸的重要组成部分^[2],密封能力直接影响摆缸工作性能。液压系统对密封件的核心需求包括密封性好、摩擦阻力小、摩擦因数稳定性强且具备自主补偿能力。因此,对液压摆缸叶片密封性能预测方法的深入研究,可以有效地解决这些问题,提高液压摆缸的设计和制造水平,为工业生产提供更加优质的机械设备。

针对机械密封性能预测问题,学者们给出不同见解:朱德^[3]等人从密封圈密封机理出发,利用 Fluent 软件建立流体膜模型,有限元分析静密封和动密封状态,获得密封区域精确压力分布,明确当前密封性能详细状况。赵玉霞^[4]等人利用重构分形接触模型展现端面形态,计算机械密封泄漏率和平均膜厚,探究不同参数密封性能的改变趋势。

但上述方法没有考虑定子、转子和密封元件之间的油膜润滑行为,对密封失效模式的研究不够透彻,导致预测结果精度不高。为此,提出一种基于机器学习的液压摆缸叶片密封性能预测模型。划分密封性能指标,收集密封性能实时数据,以泄漏率、密封环热量作为输入层单元的输入值,将性能预测指标作为输出值,通过 BP 神经网络创建液压摆缸叶片密封性能预测模型。通过与不同方法的对比分析,证明所建模型密封性能预测精度高,能帮助机械领域工作人员提升器件维修效率,提升机械制造智能化水平。

1 密封性能指标分析

预测液压摆缸叶片密封性能时,需先分析密封性能指标。密封性能指标是评价液压摆缸叶片密封性能的标准,根据不同的应用场景和需求,可以制定不同的评价标准。通过分析密封性能指标,可以确立评价标准,了解液压摆缸叶片密封性能的关键因素,改善叶片的密封性能,为后续的预测和测试提供依据。因此下文先明确性能指标类型。从敏感性与疲劳性两方面入手分析性能指标,为液压摆缸叶片密封性能预测工作建立基础。

1.1 敏感性指标

影响液压摆缸叶片密封性能退化的元素较多,涵盖内外载荷、运行时长等^[5-7],将影响因素转化为自变量,计算量大且容易产生较大偏差,因此,需明确影响密封性能的重要参数。敏感度分析即自变量改变对因变量影响程度的高低,采用敏感性指标挑选影响密封失效的关键要素。液压摆缸叶片的敏感性指标是指在不同工作条件下,叶片与摆缸内壁之间的间隙大小对液压摆缸性能的影响程度。敏感性指标的好坏直接影响到液压摆缸的稳定性和可靠性。通过分析敏感性指标,可以了解液压摆缸叶片与摆缸内壁之间的间隙变化规律,为提高液压摆缸叶片密封性能提供

依据。

采用 Morris 方法计算敏感性指标,在明确其他元素状态下,能够独自更改某个元素,推算此元素对响应量的影响水平。Morris 方法是一种用于评估模型参数对模型输出结果影响的全局敏感性分析方法。该方法通过改变参数值,计算不同参数值下模型输出结果的变化,以此来评估不同参数对模型输出结果的影响大小。在计算液压摆缸叶片的敏感性指标中,可以使用 Morris 方法来评估不同参数对密封性能的影响。首先,需要确定需要评估的参数。然后,根据 Morris 方法的步骤,对每个参数进行多次随机抽样,并记录相应的模型输出结果。最后,通过对比不同参数的输出结果,计算出每个参数对模型输出结果的贡献度和重要程度,从而评估其敏感性。Morris 方法的应用可以帮助识别模型中哪些参数对输出结果具有较大的影响,从而优化模型设计和参数选择,提高模型的预测精度和可靠性。总之, Morris 方法是一种简单、有效的全局敏感性分析方法,在液压摆缸叶片密封性能测试等领域具有广泛应用前景。通过评估不同参数对模型输出结果的影响,可以帮助研究人员和决策者更好地理解 and 优化模型,提高决策的可靠性和效果。假设 a_0 是原始输出响应量, b_1, b_2, \dots, b_n 是影响响应量 a_0 的变量因子,则变量因子与对应响应量的关系式为:

$$a_i = a_0(b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (1)$$

其中: a_i 为计算第 i 次后变量和因子相对响应量。

倘若其余因子是固定值,计算多个敏感度均值,获得变量因子对响应量 a 的影响水平,敏感性指标判断因子表达式为:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(a_{i+1} - a_i)/a_0}{(c_{i+1} - c_i)/100} \quad (2)$$

其中: C 为敏感性判断因子; n 为 Morris 方法的计算数量; c_i 为计算第 i 次变量因子的值和变量因子原始值的变化率。

将敏感性判断因子依照敏感等级进行划分,方便挑选敏感性参数。将敏感性判断因子依照敏感等级进行划分是为了更加准确地评估液压摆缸叶片密封性能,根据不同因素对系统性能影响程度的大小,将因子划分为极度敏感、敏感、一般敏感和不敏感等级,划分结果如表 1 所示。

表 1 敏感性指标等级划分

| | 极度敏感 | 敏感 | 一般敏感 | 不敏感 |
|----------|---------|------------|-------------|-----------|
| C 取值范围 | [1, +∞] | [0.2, 1.0) | [0.05, 0.2) | [0, 0.05) |

划分之后,可以通过以下方法来判断液压摆缸叶片密封性能。首先,对于敏感等级较高的因子,需要进行重点关注和优化。这些因子对液压摆缸叶片密封性能的影响最为显著,需要采取有效措施加以改善。例如,如果摩擦系数被划分为敏感等级,可以优化叶片表面处理方式,降低摩擦系数,提高密封性能。其次,对于敏感等级较低的因子,可以采取适当措施进行改善。这些因子对液压摆缸叶

片密封性能的影响相对较小,但仍需要考虑和优化。例如,如果叶片材料硬度被划分为较敏感等级,可以考虑选择硬度更高的材料,提高叶片的密封性能。最后,对于不敏感等级的因子,可以不予考虑或优化。这些因子对液压摆缸叶片密封性能的影响可以忽略不计,不需要采取特殊措施进行改善。例如,如果叶片的长度被划分为不敏感等级,可以不予考虑或按照标准要求进行制造。

因此,将敏感性判断因子依照敏感等级进行划分后,可以更加精确地评估液压摆缸叶片密封性能。根据敏感等级的不同,可以采取不同的措施进行优化和改善,从而提高液压系统的性能和寿命。

1.2 疲劳性指标

液压摆缸叶片的疲劳性指标是指在长期工作过程中,叶片与摆缸内壁之间的间隙大小对液压摆缸性能的影响程度。疲劳性指标的好坏直接影响到液压摆缸的使用寿命和维护成本。通过分析疲劳性指标,可以了解液压摆缸叶片在长期工作过程中的变化规律。

液压摆缸密封元件通常使用聚氨酯、丁腈橡胶等材料制成。橡胶制品会受到循环应力影响,引起内部和表面发生微小结构变化^[8-9]。基于断裂力学角度,采用能量释放模式分析橡胶密封材料疲劳破坏过程。在循环应力作用下,密封件裂纹逐步扩大,裂纹扩大速度计算式为:

$$\frac{de}{dA} = f(T) = GT^{\beta} \quad (3)$$

其中: e 为裂纹长度; A 为应力循环周期; T 为应变能释放率; G 为橡胶材料常数; β 为裂纹扩大系数。

基于能量守恒定律,若裂纹开始扩大,外力作用的功即密封圈内部势能 U_e 与裂纹扩大时释放的弹性应变能总和^[10-11]。应变能释放率 T 表达式为:

$$T = \frac{1}{G} \left[\frac{\partial \cdot U_e}{\partial e} \right] = \alpha \omega k(\varphi) \quad (4)$$

其中: ∂ 为应变能释放速率; ω 为应变能密度; $k(\varphi)$ 为能量释放函数。

若密封元件从原始裂纹长度 e_0 扩展到裂纹长度 e ,应力循环总周期为 A ,对式(3)采取积分运算,得到密封疲劳性指标计算。

$$\chi = \int_{e_0}^e (GT^{\beta} A) dT \quad (5)$$

计算出密封疲劳性指标后,可以通过以下方法来实现液压摆缸叶片密封性能的优化。

1) 优化叶片材料:选择合适的叶片材料可以提高其耐久性和密封性能。例如,选择高强度、高韧性、高耐腐蚀性的材料,如不锈钢、高强度钢等,可以提高叶片的耐久性和密封性能。

2) 优化叶片表面处理方式:采用适当的表面处理方式可以提高叶片的密封性能。例如,采用电镀、喷涂、气体渗碳等表面处理方式,可以改善叶片表面的硬度、摩擦系数和耐蚀性,提高其密封性能。

3) 优化叶片几何形状:叶片的几何形状对其密封性能

也有很大影响。可以通过优化叶片的几何形状,如改变叶片的角度、长度、宽度、厚度等参数,来提高其密封性能。

4) 优化液压系统工作条件:液压系统的工作条件也会影响叶片的密封性能。可以通过调整液压系统的工作压力、工作温度等参数,来优化叶片的工作条件,提高其密封性能。

综上所述,通过优化叶片材料、表面处理方式、几何形状和液压系统工作条件等方面,可以实现液压摆缸叶片密封性能的优化。

2 预测模型构建

2.1 样本数据的确立

采用密封寿命试验来获得数据,明确叶片寿命特征与失效规律^[12-14]。通过加速试验得到多个样本值,为确保失效定理相同状态,更改试验条件让叶片密封提前失效,减少试验周期。动环、静环是密封重要零件,失效模式为滑动磨损。基于增强磨损载荷,密封磨损失效极限损伤 τ_f 表达式为:

$$\tau_f = \chi \cdot C \cdot l_1 \sigma_b^{mm} \quad (6)$$

其中: σ_b^{mm} 为拉伸强度; l_1 为滑动摩擦因数。

密封面磨损率 ζ 解析式为:

$$\zeta = \left(\frac{\tau_f \cdot K_w}{L} \right) o_c v \quad (7)$$

其中: K_w 为磨损系数; L 为布氏硬度; o_c 为端面比压力; v 为磨损速率。

将试验值与比例系数表示相同工况下的采集时间^[15-17]。密封泄露率 r 计算过程为:

$$r = \psi R_n \cdot \frac{\zeta \cdot (u_2 - u_1)}{s_2^2 - s_1^2} \quad (8)$$

其中: ψ 为径向总收敛锥度; R_n 为接触面半径均值; u_1 、 u_2 为密封面内外侧压力; s_1 、 s_2 为密封面内外边缘膜厚度。

密封液膜最大厚度与最小厚度分别为:

$$h_{\max} = \sqrt{\frac{\omega_c \theta}{q_c}} \quad (9)$$

$$h_{\min} = \psi (R_2 - R_1) M_g \quad (10)$$

其中: ω_c 为转子转速; θ 为接触压力的最大位置; q_c 为介质油压; R_1 、 R_2 为密封面内外半径; M_g 为载荷系数。

接触隙膜厚为:

$$h_c = 3\kappa \quad (11)$$

其中: κ 为高峰粗糙度标准差。

基于流体动力润滑定理,利用雷诺方程获得油膜厚度和密封间隙油膜压力之间的关联,设定前提条件:端面密封区润滑油膜厚度轴向不产生改变、压力在油膜厚度方向无改变和介质黏度沿膜厚方向不变^[18]。基于以上,创建密封油膜分布三维坐标系,转子、定子、端面密封共同轴为 y 轴,圆周方向为 x 轴,半径方向是 z 轴。油膜厚度和密封间隙油膜压力的耦合关系表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\gamma m^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) h_c + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\alpha m^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \right) h_c =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho W_0 m) + \frac{\partial(\rho m)}{\partial t}(h_{\max} - h_{\min}) \quad (12)$$

其中： γ 为油膜宽度； m 为油膜厚度； η 为介质油液黏度； ρ 为介质油液压力； W_0 为密封面对应速率； ρ 为介质油液密度； η 为介质油液黏度。

将液压摆缸叶片密封的动环、静环看作一个量筒体^[19-20]，长度是 L_z ，截面积是 D ，外圆周长是 Q ，由此单个密封环的热量 V_i 表达式为：

$$V_i = \mu_{L_z}^j D \Delta T / L_z \quad (13)$$

其中： j_i 为散热指数； μ_{L_z} 为密封环导热系数； ΔT 为端面温度和介质温度的差。

2.2 基于 BP 人工神经网络的液压摆缸叶片密封性能预测

分析密封性能指标后，为及时发现液压摆缸叶片密封漏洞，提升机械使用寿命，设计一种基于人工神经网络的液压摆缸叶片密封性能预测模型。人工神经网络是一种模拟生物神经网络的数学模型，它通过多层神经元之间的相互连接和信息传递，实现对数据的学习、分类和预测。

在预测液压摆缸叶片密封漏洞中，人工神经网络可以通过学习历史数据和特征，建立预测模型，并对新的数据进行预测和分类。这样可以有效地提高预测精度和效率，为液压摆缸叶片密封性能测试和优化提供重要的参考依据。同时，人工神经网络还可以通过增加输入参数、优化模型结构等方式来进一步提高预测精度和鲁棒性，具有很大的应用潜力和意义。

人工神经网络通过简单的神经元互连构建复杂网络系统，呈非线性动力特征。构建三层人工神经网络模型，能完成不同类型的函数映射。误差反向传播前馈多层神经网络，即反向传播神经网络（back propagation, BP）神经网络，网络结构如图 1 所示。

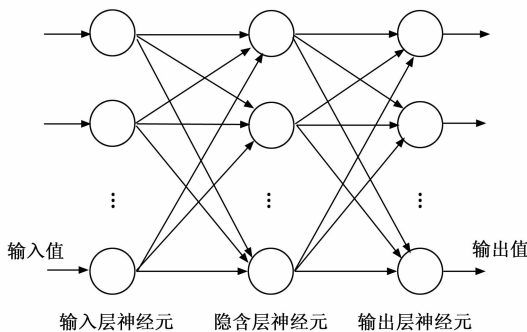


图 1 BP 神经网络结构示意图

创建模型前，采集和时间有关的泄漏率与密封环热量。将泄漏率、密封环热量作为输入层单元的输入值，将性能预测指标作为输出值。液压摆缸叶片密封性能中的泄漏率和密封环热量是两个重要的参数，对系统性能和寿命有着直接的影响。泄漏率是指液压系统中液体从密封处流失的速率。在液压摆缸中，泄漏率通常与密封环的设计、材料和加工精度等因素有关。高泄漏率会导致系统效率低下、

能源浪费和油液污染等问题。因此，为了保证系统的有效性和可靠性，需要采取措施减小泄漏率，如改善密封环材料、加强密封面加工精度和优化密封结构等。密封环热量是指密封环在运行过程中产生的热量。在液压摆缸中，密封环热量主要是由于摩擦产生的，会导致密封环变形、老化、裂纹等问题，严重影响系统的寿命和可靠性。因此，需要采取措施减少密封环热量，如改善密封环材料、减少摩擦系数、增加润滑剂等。综上所述，泄漏率和密封环热量是液压摆缸叶片密封性能中两个重要的参数，对系统性能和寿命有着直接的影响。为了保证系统的有效性和可靠性，需要采取措施减小泄漏率、减少密封环热量，从而提高液压系统的效率和寿命。

根据 2.1 确立样本数据后，利用图 1 的 BP 人工神经网络进行数据训练。将泄漏率、密封环热量作为输入层单元的输入值^[21]，将性能预测指标作为输出值。

假设反向传播模型中包括多个输入，设置泄漏率、密封环热量的输入数据统一为 $x_1, x_2, \dots, x_n, w_1, w_2, \dots, w_m$ 为各输入相应的权值，该权重可衡量液压摆缸泄漏率和密封环热量集数据对密封性能影响程度的大小； N 为输入数据的总和； θ 代表液压摆缸泄漏率和密封环热量集的阈值。液压摆缸性能预测模型为 R ：

$$R = f(N) \quad (14)$$

$$N = \sum_{i=1}^n x_i w_i - \theta \quad (15)$$

利用双曲正切函数可获取任意输入的权值与阈值的具体值。

针对预测模型中的任意一组样本数据，推算每个单元的预测输出值为：

$$s = \sum_{i=1}^n A \cdot r_{ij} g_i - V_j \theta_j \quad (16)$$

其中： r_{ij} 为第 i 个输入单元和第 j 个中间层单元的泄漏率； g_i 为第 i 个输入单元的输入系数； θ_j 为中间层第 j 个单元的临界值。

设定每层的临界值的初始值均为 1，以修正指标输出误差。待所有样本训练结束后，推导网络全局误差值。如果低于设定的极小值，即完成网络训练，输出密封性能预测结果；反之再次把全部样本引入网络实施训练。

3 实验分析

为验证研究方法的应用有效性，实验采用 YX-1000A 型液压摆缸作为测试对象，其油液压力为 17 MPa，摆角速度位 15 rpm，液压摆缸运行温度是 26℃。具体实物图如图 2 所示。

液压摆缸叶片密封参数如表 2 所示。

为验证液压摆缸叶片的密封性能，泄漏量是其关键测试指标。叶片顶部与两侧直角位置矩形圈位置的密封均有 O 形圈参数作用，O 形圈的预压缩量与大小对密封性能有较大影响。实验探究处于不同 O 形圈尺寸，获取所提方法叶



图 2 YX-1000A 型液压摆缸

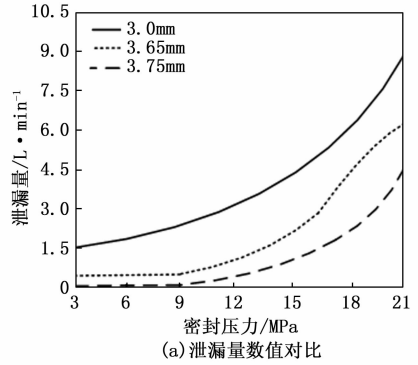
表 2 叶片式液压摆缸密封参数

| 参数 | 数值 |
|-------------------------|------|
| 高低压腔压差/MPa | 0~15 |
| 流体动力黏度/Pa·s | 0.04 |
| 油膜密度/kg·m ⁻³ | 810 |
| 缸体内圆半径/mm | 53 |
| 缸体外圆半径/mm | 35.5 |
| 叶片密封宽度/mm | 2 |
| 叶片长度/mm | 75 |
| 泄露缝隙宽度/mm | 2.0 |
| 曲面密封长度/mm | 6.31 |
| 密封件和缸体摩擦系数 | 0.05 |
| O 形圈压缩量/mm | 0.75 |

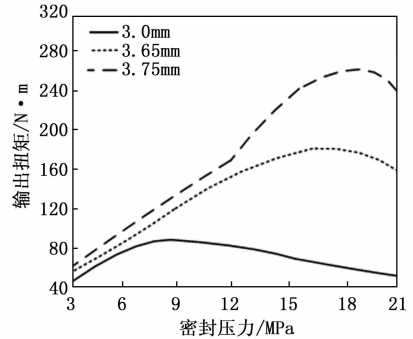
片密封压力下泄漏量与输出矩阵情况。因此,先利用 FLUKE 700G31 型液压泄漏检测仪定量检测液压摆缸的泄漏量,液压泄漏检测仪是一种专门用于检测液压系统泄漏的设备。利用该设备检测的泄露量数据。针对液压摆缸密封压力变化下的输出扭矩,在液压摆缸的输出轴上安装 HBM T20WN 扭矩传感器,通过测量输出轴上扭矩的大小得到实验数据。泄露量和输出扭矩实验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,O 形圈截面直径是 3.0 mm 时,泄露量为线性分布趋势,密封压力低于 9 MPa 时,输出矩阵为线性增长分布态势,高于 9 MPa 时,输出扭矩慢慢减少;O 形圈截面直径是 3.75 mm,密封压力低于 12 MPa 时,泄露量较少,若密封压力高于 12 MPa,密封泄露量急速升高,相对输出扭矩减少,密封彻底失效。以上实验结果与真实场景下液压摆缸叶片密封失效规律完全相符,展现了所提方法密封性能预测准确性。

为进一步证明所提方法优越性,将文献 [3] Fluent 方法与文献 [4] 分形接触法作为对比方法。以 FLUKE 700G31 型液压泄漏检测仪检测的泄露量数据作为真实值,应用文献 [3] 方法、文献 [4] 方法以及研究方法分别预



(a) 泄露量数值对比



(b) 输出扭矩数值对比

图 3 密封性能预测结果

测液压摆缸的泄露量,对比其余真实值的互相关系数,以此判断该方法的应用效果。互相关系数指标是用于衡量两个变量之间线性关系强度的统计量。它通常表示为 r ,其取值范围在-1 到 1 之间,0 表示没有线性关系,正数表示正相关,负数表示负相关。具体实验结果如图 4 所示。

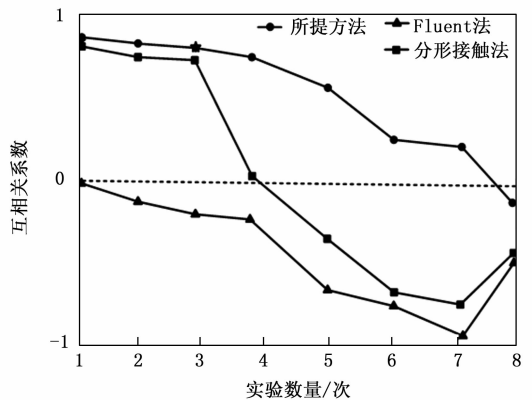


图 4 密封泄露预测结果对比

如图 4 所示,三种方法密封性能预测结果。从中看出,所提方法预测精度最高,能够有效分析左右摆缸压力互相关系数的变化走向,精准预测叶片密封泄露何时超出预警线,给液压摆缸密封失效故障的修复奠定基础。

在此基础上,为了验证不同方法应用的效率,以密封性能预测的耗时为指标,测试不同方法完成 80 次实验的累计耗时,图 5 为相同实验环境下密封性能预测时间对比。

从图 5 可知,在 80 次实验迭代过程中,文献 [3] Flu-

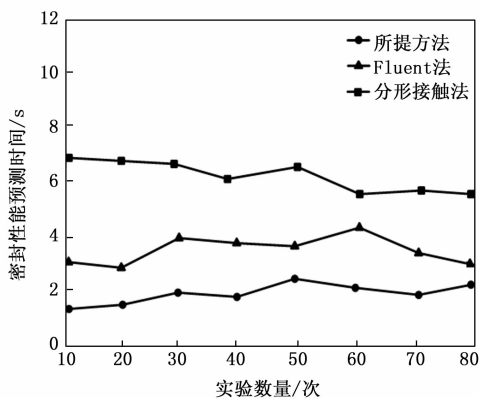


图 5 密封性能预测时间对比

ent方法与文献[4]分形接触法的耗时始终高于2s,且分形接触法的预测耗时最高为7s,说明这2种方法的应用效率较差。所提方法在整个实验过程中耗时低于2s,能够消耗较少的时间完成密封性能预测任务,在保证预测结果精度的同时降低计算时间复杂度,具备更好的实用性。

4 结束语

为防止产生液压摆缸叶片密封泄露现象,提升液压摆缸应用效率与使用寿命,设计一种基于机器学习的液压摆缸叶片密封性能预测模型。所建模型计算简单、操作性强,在明确密封性能指标前提下,利用机器学习算法中的BP神经网络进行学习训练,精准预测叶片密封的变化趋势。实验证明,研究方法的密封性能预测具有可靠性与鲁棒性,给机械领域工作人员提供对应数值参考。

液压摆缸叶片密封性能预测模型是液压摆缸设计和制造中的重要技术手段,虽然本文已经得到了较好的研究成果,但是仍然存在一些问题:

1) 模型精度不够高。本次研究只考虑了叶片与固定环之间的密封性能,而忽略了叶片与转动环之间的相互作用。这种简化假设会导致模型精度不够理想。

2) 模型参数的确定仍具有一定难度。液压摆缸叶片密封性能受到多种因素的影响,如叶片材料、叶片形状、工作介质等。这些参数的测量和确定比较困难,缺乏统一的标准和测试方法。

3) 本文模型适用范围有限。研究构建的预测模型是基于特定条件下的理论推导或实验数据建立的,其适用范围有限。对于工作条件变化较大或结构不同的液压摆缸,模型可能无法准确预测其密封性能。

参考文献:

[1] 张天,葛卫,聂松林,等. 水液压阀控摆动缸结构设计及动态性能仿真分析[J]. 液压与气动, 2021, 45(7): 28-34.
 [2] 龙智,郑琪,张天辉,等. 基于线激光扫描的航空发动机叶片非接触式检测研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 50-53, 60.
 [3] 朱德,刘杰,肖欣谕,等. 基于Fluent的液压密封流体膜

压力精确化研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(10): 122-129.
 [4] 赵玉霞,丁雪兴,王世鹏. 基于分形接触理论的机械密封泄漏率与膜厚预测[J]. 润滑与密封, 2022, 47(8): 156-163.
 [5] 崔颖,于颖嘉,王永亮,等. 一种梁式管接头密封性能与结构参数敏感性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 147-155.
 [6] 李凯峰,孙首群,周冰旭. 轴表面粗糙度以及温度对唇形油封密封性能的影响[J]. 流体机械, 2022, 50(3): 26-33, 59.
 [7] 陈晨,钱国庆,许兴彦,等. 基于ABAQUS的流体压力渗透O形圈密封性能仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(2): 86-90.
 [8] 王艳艳,秦朝轩,赵方超,等. 基于循环冲击加速试验的某O型橡胶密封圈寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 1-7.
 [9] 杨文吒,颜家杰,马勇,等. 湍流剖面仪的数据采集系统研究及耐压分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 90-95.
 [10] 郑国权,窦健,卢继哲,等. 基于冗余分析的用电信息采集系统数据压缩方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 70-77.
 [11] 孟祥铠,孟令超,马艺,等. 多孔质机械密封耦合润滑模型与密封性能分析[J]. 化工学报, 2022, 73(10): 4576-4584.
 [12] 贺创波,许超,杨钊,等. 考虑沟槽边界和粘贴质量的管片密封垫防水性能研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 195-201.
 [13] 运睿德,陈志英,刘勇,等. 周向弹力分布对圆周密封装置密封性能的影响[J]. 推进技术, 2021, 42(6): 1361-1371.
 [14] 王虎军,何新智,高中泉,等. 磁流体-螺旋组合密封对液体介质的密封性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(11): 809-814.
 [15] 赵张帆,石湘,化怡龙. 海底管道维修管卡密封结构的性能分析及测试[J]. 海洋工程, 2023, 41(1): 101-109.
 [16] 蒋兆翔,何攀,刘才学,等. 核反应堆压力设备环形密封面泄漏监测与分析诊断研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 20-24.
 [17] 李阁强,袁畅,王帅,等. 基于协同进化多目标遗传算法的复式液压摆缸缸结构设计[J]. 船舶力学, 2022, 26(11): 1694-1704.
 [18] 杨敏,曾良才,湛从昌. 液压缸组合密封性能仿真与参数优化研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(16): 8-12, 32.
 [19] 韩小霞,冯永保,谢建,等. 宽温域下电静液作动器的液压缸活塞格莱圈密封性能分析[J]. 液压与气动, 2022, 46(10): 99-107.
 [20] 赵文奎,李阁强,毛波. 船舰转叶舵机用复式液压摆缸缸结构解耦研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(7): 27-31.
 [21] 马宇,谢良喜,加闯,等. 液压摆缸叶片密封的疲劳失效研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(5): 38-44.