

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

基于连续动态分析的自冲击密封泄漏稳定性评估与可靠性设计研究

冯聪¹, 钮硕硕¹, 王衍^{1*}, 刘永振¹, 徐乾¹, 王天烁¹, 张正阳²(¹ 江苏海洋大学 机械工程学院, 江苏 连云港 222005; ² 江苏中科能源动力研究中心, 江苏 连云港 222042)

摘要: 针对高端装备旋转轴封在变工况下的密封泄漏稳定性评估问题, 现有方法多基于离散数据点分析, 难以捕捉泄漏随工况连续变化的动态特性与临界失稳行为。本文以新型自冲击密封为对象, 提出一种融合连续动态分析与可靠性映射的评估方法。首先采用径向基函数构建泄漏量随压力与转速的连续响应曲面, 进而通过导数分析量化动态稳定性, 发现压力在 0.57 – 0.62 MPa 区间存在显著临界失稳现象, 而转速影响微弱。在此基础上, 引入全局与局部不稳定因子, 结合应力-强度干涉模型, 建立压力至可靠度的定量映射关系。案例研究表明, 该方法能有效识别失稳区间, 并提出“压力分区运行”与“参数敏感性设计”两条工程准则。所提框架不仅适用于自冲击密封, 也为具有类似非线性动态响应的机械系统稳定性评估与稳健设计提供了方法论参考。

关键词: 密封; 自冲击; 泄漏量; 可靠性设计

中图分类号: TH117.1

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-14

Leakage stability assessment and reliability-based design of self-impacting seals via continuous dynamic analysis

FENG Cong¹, NIU Shuoshuo¹, WANG Yan^{1*}, LIU Yongzhen¹, XU Qian¹, WANG Tianshuo¹, ZHANG Zhengyang²

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China; ² Jiangsu Zhongke Energy and Power Research Center, Lianyungang 222005, Jiangsu, China)

Abstract: This paper proposes an evaluation method that integrates continuous dynamic analysis and reliability mapping to address the challenge of dynamic stability assessment of mechanical systems under variable operating conditions. The effectiveness of this method is verified using self-impacting seals as the object. By constructing a continuous response surface via Radial Basis Function (RBF) and conducting derivative analysis, a significant critical instability is identified within the 0.57 – 0.62 MPa pressure range, with rotational speed showing negligible influence. Global and local instability factors are further incorporated with a stress-strength interference model to establish a quantitative pressure-reliability mapping. The framework effectively pinpoints instability zones and yields practical engineering guidelines, including "pressure-zone operation" and "parameter sensitivity design." It provides a systematic approach for the reliability design of self-impacting seals and can be extended to other

收稿日期: 2026-06-04 修回日期: 2026-07-05

通信作者: 王衍(1989—), 男, 博士, 教授, wy_seal@jou.edu.cn

第一作者: 冯聪(1993—), 男, 博士, 讲师, congfeng@jou.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52275192); 高端装备界面科学与技术全国重点实验室开放基金项目(SKLTKF25B07); 江苏省高校“青蓝工程”项目; 连云港市科技计划项目(JCYJ2046); 连云港市科技计划项目(CX1006); 江苏省研究生实践创新计划项目(KYCX25_3868); 江苏海洋大学“海州湾英才”创新计划(KQ25028); 江苏省高等教育教学改革研究课题(2025JGYB164)

引用本文: 冯聪, 钮硕硕, 王衍, 刘永振, 徐乾, 王天烁, 张正阳. 基于连续动态分析的自冲击密封泄漏稳定性评估与可靠性设计研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–14

Citation: FENG Cong, NIU Shuoshuo, WANG Yan, LIU Yongzhen, XU Qian, WANG Tianshuo, ZHANG Zhengyang. Leakage stability assessment and reliability-based design of self-impacting seals via continuous dynamic analysis[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–14

mechanical systems with nonlinear dynamic responses.

Keywords: seal; self-impacting; Leakage stability; reliability design

引 言

随着科学技术的飞速发展,现代工程系统日趋复杂与集成化,对密封技术的可靠性、稳定性和环境适应性提出了更为严苛的要求^[1]。高端装备,如航空发动机、深海装备、能源化工装置,对其中的旋转轴封提出了极为严苛的要求。这些轴封必须在高压、高速和变工况等复杂环境下稳定工作,其核心目标已超越基础的零泄漏,更追求具备卓越的长期可靠性与持久性^[2-4]。当前,密封系统的可靠性研究存在两大局限:一方面,其失效判据主要聚焦于泄漏量这一功能指标;另一方面,其设计方法仍多基于传统静态准则或稳定工况假设。这两类方法均难以准确映射工程装备所面临的实际复杂工况^[5-8]。其根源在于,工程装备的工况是动态变化的,导致密封界面的泄漏行为并非静态,而是呈现出强烈的非线性与时变特性。该泄漏行为的稳定性,直接关系到设备的运行安全、能效与全生命周期维护成本。故如何定量评估密封在连续变工况下的动态稳定性,并在此基础上进行面向可靠性的优化设计,成为提升高端密封性能与可靠性的关键科学问题。

在这一背景下,以泄漏量可控、寿命长、适应性强为突出优势的非接触式密封技术,已成为高精密封装备与高性能动力系统等领域研究热点^[9]。该技术的发展历程体现了多学科交叉融合,自早期的接触式技术起步,历经一系列突破与创新,现已演进为高度精密、无摩擦的先进密封方案。目前,以迷宫密封、浮环密封、干气密封和磁流体密封为代表的非接触式机械密封应用最为广泛,它们各具特点,但也面临不同的技术挑战。具体而言,迷宫密封结构简单可靠,在航空发动机及透平膨胀机等设备中应用广泛,但其封严效率在高负载环境下对流体状态依赖性强,高参数下易产生显著的透气效应,导致被密封介质的能量无法充分耗散,封严效率持续衰减^[10]。浮环密封相比迷宫密封,在泄漏控制与工况适应性方面更具优势,已成为危险性工艺气体压缩机轴端的传统密封型式;然而,其内部泄漏量通常较大,制造精度要求高,且配套的辅助系统成本往往显著高于密封系统本身^[11]。干气密封的

技术基础在于流体的动压与静压协同效应,具有摩擦功耗低、使用寿命长、可靠性高及辅助系统简单等优点,但其应用存在局限:低速运行时动压效应不足,难以形成有效气膜,而高速状态下又可能因气膜过厚导致泄漏率超标^[12,13]。磁流体密封则利用磁流体的磁性及气液界面张力实现动态密封,但其在耐高压、耐高温及承受高线速度方面的能力相对有限,制约了其在气体密封等苛刻工况下的应用^[14-16]。尽管上述非接触式密封技术仍存在各自的不足,但它们依然是应对高温、高压、高速等高参数工况的主流发展方向。因此,在非接触机制的基础上,致力于开发兼具结构简洁性与运行稳定性的新型密封装置,对推动技术进步具有重要的工程意义与经济价值。

本团队自主研发的自冲击密封是一种新型密封技术,其结构简单,具备零磨损与运行稳定等优点,应用潜力显著。该技术的核心机理在于利用密封间隙内发生的流体自冲击效应,将流动动能转化为内能,进而实现能量耗散与密封增效^[17-18]。目前,针对该新型密封结构的流体特性与节流效率已开展较多研究,然而与传统密封结构相似,现有研究多集中于稳态泄漏量测量或单一参数的影响分析,缺乏对参数连续变化过程中泄漏响应的连续性、敏感度及动态拐点的系统性探究^[19-21]。此外,现有的稳定性评估大多基于离散实验数据点的统计波动,难以构建覆盖全工况域连续性能响应模型,因而无法引入基于微积分理论的动态敏感性分析方法,这限制了对密封系统内在稳定机制的深入理解^[22-25]。综上所述,目前尚缺乏能够将自冲击密封的动态稳定性特征直接映射为系统服役可靠度、并用于指导其稳健性设计的系统性方法,这在一定程度上制约了该新型密封结构的可靠性优化与高效运行。

本文以新型自冲击密封为研究对象,通过自主搭建的密封试验平台,获取压力与转速单因素变工况下的泄漏离散数据。其次,采用径向基函数插值方法,构建泄漏量随工况参数变化的连续性能响应曲面,实现从离散点到连续规律的跨越。进而,基于该连续模型,引入一阶与二阶导数分析,定量评估全工况域内泄漏的敏感度与变化加速度,并提出

一个综合的动态稳定性指标,识别临界失稳区间。最后,将动态稳定性特征量化为可靠性衰减函数,建立压力-可靠度映射模型,并据此提出压力分区运行准则与参数敏感性设计准则,完成从机理分析到可靠性优化设计的升级。

1 变工况影响下新型自冲击密封泄漏稳定性试验

1.1 自冲击密封的工作原理

新型自冲击密封结构的工作原理主要来源于特斯拉阀结构的单向导通性^[26],如图1所示。该结

构不依赖任何活动部件,仅通过特定的空间构型即可实现对流体定向流动的调控。当流体沿正向(从右至左)流动时,可顺畅绕过所有翼状障碍,流动阻力较小;而在反向流动时,流体将在弯管与水平管交汇处产生强烈冲击与阻滞,从而显著抑制逆向流动。翼状结构的数量越多,流体向前推进所遇阻力越大,由此形成明显的单向导通特性。特斯拉曾提出一个概念模型:假设流体经第一个翼状结构后的泄漏率为 $1/X$,则经过第 n 个翼状结构后,泄漏率将降至 $(1/X)^n$ 。显然,即使 X 取值不大,亦可在多级结构后实现极低的泄漏水平,近似于理想的阀门节流效果。

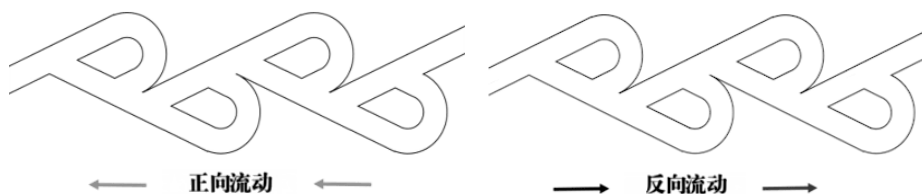


图1 特斯拉阀原理图

Fig.1 Tesla valve principle

1.2 泄漏稳定性试验装置

使用课题组自主研发的密闭型立式新型自冲击密封实验装置采集试验数据,该装置结构如图2所示。该装置主要包括泄漏腔、密封腔、压力与温

度传感器、转速电机、数据采集系统及泄漏收集与测量装置等,该装置无负重限制、单套密封避免双套对称结构要求。

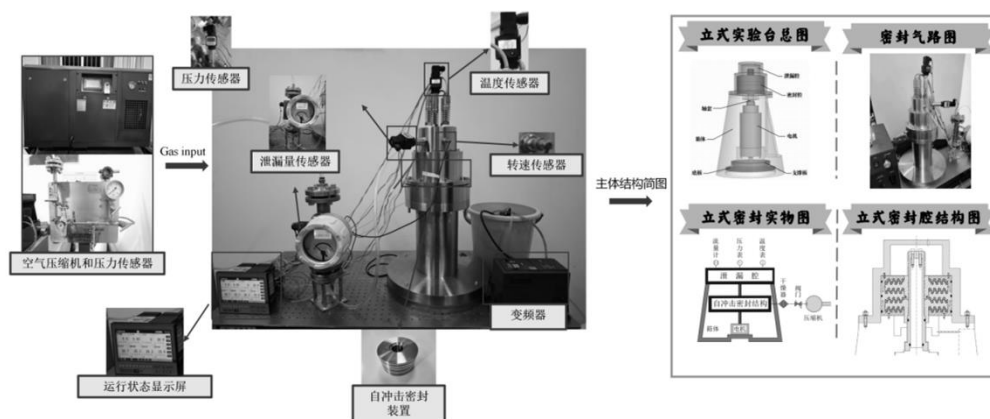


图2 密闭型立式新型自冲击密封实验装置

Fig.2 Vertical experimental platform

试验采用的自冲击密封装置结构如图3所示,主体结构主要由外环、静环及悬柱组成。其中,层叠型密封结构能够高效布置多级密封单元,并支持沿轴向集成动环、静环与悬柱,因而成为该密封形式中优先采用的技术方案。该密封系统依据特斯拉阀结构的冲击阻塞效应,高压介质进入后会被逐

级节流降速,当级数足够多时,即可实现密封介质的零泄漏。这种结构具备的逐级自冲击阻流形式,节流效率明显高于其他非接触式密封形式。

1.3 泄漏稳定性试验设计

为模拟自冲击密封结构在实际变工况条件下的泄漏稳定性,本文选择工作介质压力 P 与主轴转

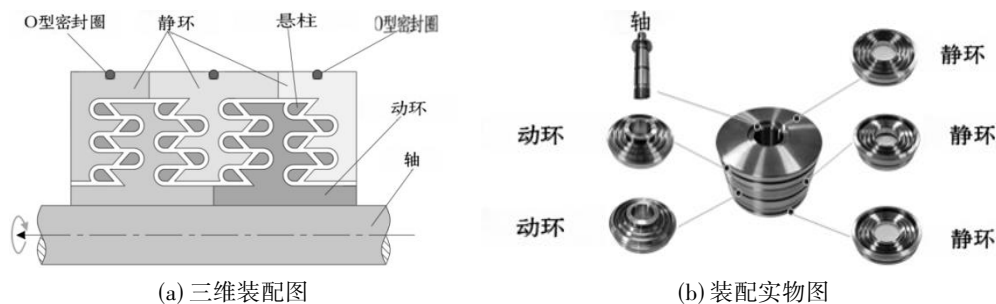


图3 自冲击密封装置结构

Fig.3 Laminated self-impact seal structure

速 V 两种关键变工况作为自变量,采用单因素控制变量法,分别研究二者对密封泄漏量的独立影响规律。实验中,当考察某一变量时,另一变量保持为固定值,以隔离其影响,确保数据反映单一变量的作用效果。 P 设置 16 个采样点,覆盖区间为 0.1~0.85MPa, V 设置 17 个采样点,覆盖区间为 0~8000rpm。在压力变化实验中,转速固定为某一特定值(3000 rpm);在转速变化实验中,介质压力固定为某一特定值(0.5 MPa)。其他环境与介质条件(如温度、介质类型、密封间隙等)均保持一致。

采用图2中所示实验平台中的压力传感器、温度传感器及泄漏收集装置,通过高速数据采集系统实时记录工况参数与泄漏量。泄漏量数据的记录必须在每种工况稳定运行一定时间后,进行多次采集取平均值,以确保数据可靠性。为模拟工程环境中的工况变化,试验中每组工况分别按照变量增加与变量减少的顺序进行采样,并且每个采样点至少重复3次试验。记录的部分试验结果如表1所示。该数据集不仅包含了静态工况点下的泄漏性能,更通过记录压力或转速“递增”与“递减”过程的动态变化,为深入揭示密封性能的时变与迟滞特性提供了关键依据,是后续进行泄漏稳定性动态评估与可靠性优化设计分析的实证基础。

2 可变工况下的稳定性动态评估

2.1 连续性能响应曲线构建

基于第2节中得到的都是不同工况影响下的泄漏量离散数据,无法定量评估固定时间范围内的泄漏稳定性,故采用有效的插值方法拟合数据,得到连续的泄漏量响应面模型是进行动态评估与可靠性优化的模型基础。径向基函数是1种高效准确的插值算法,能够逼近任意的非线性函数,可以处理

表1 部分试验结果

Table 1 Partial Test Results Record Table

参数 序号	1(递增)	2(递减)	3(递增)	4(递减)	5(递增)	6(递减)
$P=0.10\text{MPa}$	5.0	4.7	4.9	4.6	4.5	4.7
$P=0.35\text{MPa}$	10.8	10.5	10.8	10.8	10.7	10.4
$P=0.55\text{MPa}$	14.8	14.7	14.5	14.4	14.4	14.4
$P=0.85\text{MPa}$	17.3	17.3	17.0	17.0	17.0	17.0
$v=0\text{Rpm}$	15.3	13.98	13.80	13.5	13.80	13.7
$v=2500\text{Rpm}$	15.13	14.01	13.50	13.40	13.70	13.80
$v=5500\text{Rpm}$	14.61	14.07	13.70	13.90	13.70	13.70
$v=8000\text{Rpm}$	13.89	14.14	13.80	13.80	13.60	13.60

系统内的难以解析的规律性,具有良好的泛化能力,并有很快的学习收敛速度,在函数逼近理论应用广泛^[27,28]。径向基函数网络总共分为3层:输入层、隐藏层和非线性激活函数和线性径向基神经网络输出层,输入可以被建模为实数向量。输出是输入向量的1个标量函数,径向基简单网络模型如图4所示,图中 X 表示输入层样本集($X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$), W_j 表示为隐含层与输出层之间的权重值。

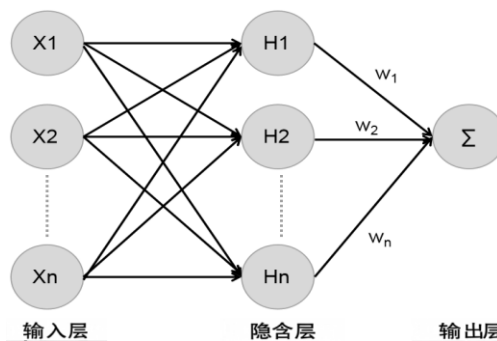


图4 径向基简单网络模型

Fig.4 Radial basis simple network model

径向基函数是1种径向对称函数,描述空间样本点 X 到插值样本点 X_i 之间欧氏距离的单调函数,可以具体描述为 $\varphi(\|X - X_i\|)$ 。其中的 $\|\cdot\|$ 是欧几

里德范数, X_i 是径向基函数的中心。目前常用的径向基函数是高斯核函数, 径向基函数网络输出层的结果为隐含层节点输出的线性加权组合, 具体通过 $Y(X)$ 表达, 式中 $j=0$ 时表示为偏置神经元, h 表示为隐含层节点数, σ 表示节点宽度, $\exp(-\|X-X_i\|^2/2\sigma^2)$ 表示高斯核函数。

$$Y(X) = \sum_{j=0}^h W_j \exp\left(-\|X-X_i\|^2/2\sigma^2\right) \quad (1)$$

区别于复杂系统的突发故障, 可变工况影响下的密封泄漏量变化应该是 1 个缓慢的非线性变化过程, 该连续性能响应曲线反映了工况参数 P 、 V 与泄漏量 ΔE 之间的映射关系, 将工况参数 P 、 V 作为输入, 泄漏量 ΔE 作为期望输出进行训练, 即可实现对

连续性能响应曲线的构建^[29-31]。为了验证插值精度, 首先分别从表 1 中每组试验的 16 个(压力)或 17 个(转速)采样点中, 按等间隔均匀抽取 8 个点作为训练集, 剩余点作为测试集, 构建泄漏量连续曲线, 并计算插值点与剩余的 48 组真实数据的误差。RBF 连续曲线模型对比如图 5 所示。图 5(a)中能够看出, 基于训练好的 RBF 模型生成了实验压力范围内的连续泄漏曲线(200 个密集点), 曲线平滑且覆盖整个压力区间, 表明模型能够有效捕捉泄漏量随压力变化的连续趋势。图 5(b)中能够定性的观测到样本点均匀落在理想预测性两侧, 回归线与理想预测性偏差小。

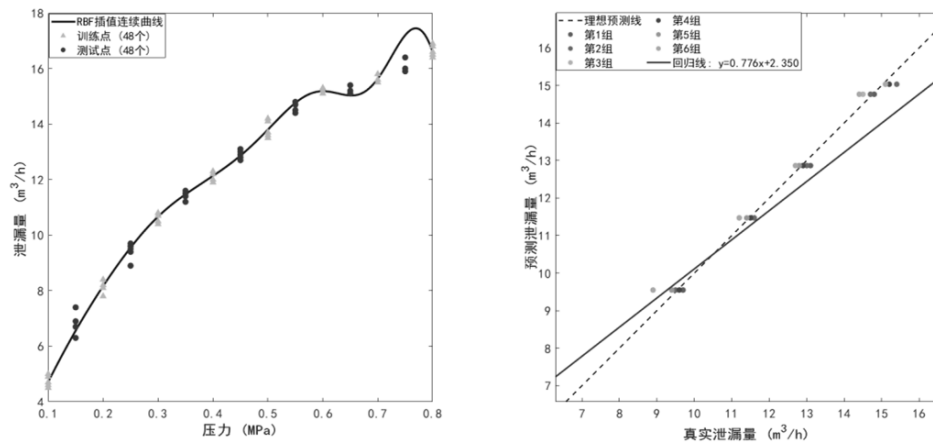


图5 RBF连续曲线模型

Fig.5 Comparison chart of the RBF continuous curve model

注:(a)连续泄漏曲线 (b)误差检验

为了量化 RBF 模型的整体预测精度, 进行连续性能响应曲线的误差对比, 如图 6 所示。从图 6(a)中能够看出 MAE 范围: 0.938–1.065 m³/h, 组间标准差为 0.0487 m³/h; RMSE 范围: 1.984–2.057 m³/h, 组间标准差为 0.0333 m³/h; MaxAE 范围: 5.438–5.738 m³/h, 组间标准差为 0.1549 m³/h; 结果表明各组误差波动较小, 表明 RBF 模型对不同数据组具有稳定的预测能力, 未出现显著的系统性偏差, 验证了模型在不同样本下的泛化性能。从图 6(b)中能够看出测试点大部分都落在误差带内, 其中预测值的 MAE 为 0.9915 m³/h, R^2 为 0.6366, 说明模型预测精度显著高于数据自身的波动水平, 具有较好的工程参考价值。

采用 RBF 算法分别训练表 1 中的两种工况数据, 基于 6 组试验数据的平均值作为 RBF 模型的训

练目标, 将递增与递减路径间的差异(最大约 5%)归入模型误差处理, 建立压力与转速影响下的泄漏量连续响应曲线, 如图 7 所示。变工况是工程实际中的常态, 图 7 中能够看出在不同工况下泄漏量的变化幅度差别很大, 压力工况影响的泄漏量从 4.7 显著增长至 17.1, 变化幅度高达 262.29%, 相比转速工况 2.41% 的变化幅度, 压力对泄漏量的影响高出 2 个数量级, 这一差别也能看出压力是主导泄漏量的关键因素, 并且泄漏量随压力增加呈明显非线性增长趋势, 符合典型机械密封泄漏特性。为了定量分析变工况对泄漏量的影响程度, 同时进行后续的可靠性优化设计, 需要对 RBF 构建的连续曲线进行稳定性动态评估。

2.2 稳定性动态评估

RBF 算法得到的连续响应曲线本质上是在有

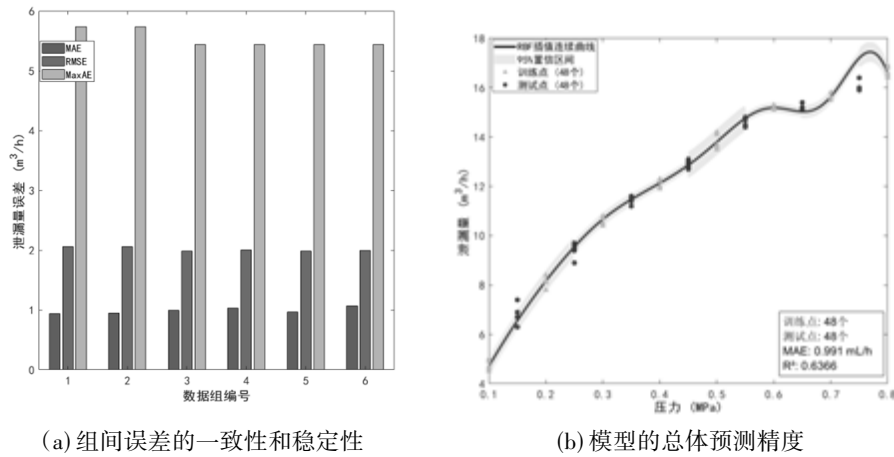


图6 连续性能响应曲线的误差对比

Fig.6 Comparison of Error in Continuous Performance Response Curve

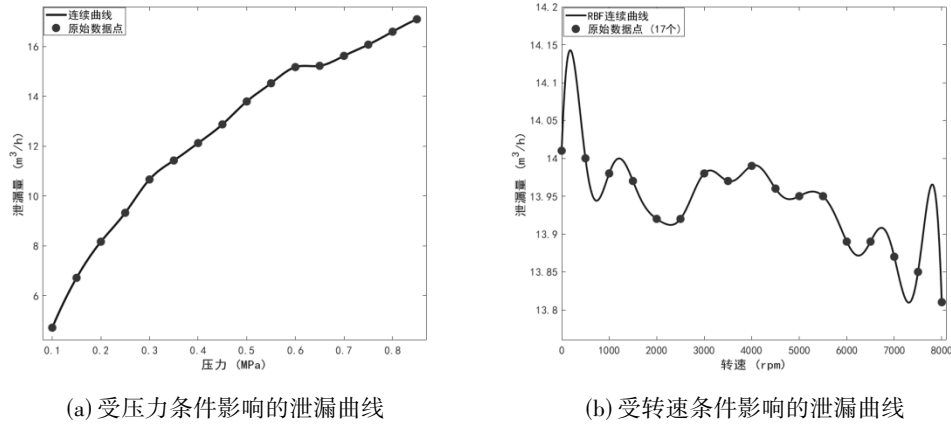


图7 可变工况下的连续性能响应曲线

Fig.7 Continuous performance response curve under variable operating conditions

限的离散数据点之间通过插值实现的样本量扩充,当间距设置的无限小时,数据点可以近似地看作一条连续响应曲线^[32]。基于扩充的样本集,首先通过计算变工况参数与泄漏量的一阶导数,观察泄漏量的变化速率,找到变化率最大的波动区间,如公式(2)所示,其中 Δx_p 表示RBF插值的步长, i 表示离散工况参数点的索引, $L_p(i)$ 表示第 i 个索引对应的泄漏量。然后计算二阶导数,如公式(3)所示,观察泄漏量变化率加速度,该参数可以反映连续曲线的凹凸性与拐点。

$$\frac{dL_p(i)}{dx} = \frac{L_p(i+1) - L_p(i)}{\Delta x_p} \quad (2)$$

$$\frac{d^2L_p(i)}{dx^2} = \frac{L_p(i+2) - 2L_p(i+1) + L_p(i)}{(\Delta x_p)^2} \quad (3)$$

最后定义一个稳定性指标 S ,如公式(4)所示。该指标是一个综合评价泄漏曲线动态稳定性的无

量纲指标,取值范围界定于0到1之间, S 值越高表示泄漏曲线越稳定(对工况变化越不敏感), S 值越低表示泄漏曲线越不稳定(对工况变化越敏感)。为了使该模型能够匹配更多结构的密封系统,定义了 α 与 β 两种工程系数,分别用于调节二阶导数最大值和一阶导数方差的权重,本质是为了调控局部曲率及波动性对最终稳定性影响的权重^[33]。对于本文的新型自冲击密封结构,重点研究全工况范围内波动特性对最终性能稳定性的影响,故 α 取0.5, β 取1。

$$S = \frac{1}{1 + \alpha \left| \frac{d^2L_p(i)}{dx^2} \right|_{\max} + \beta \cdot \text{Var} \left(\frac{dL_p(i)}{dx} \right)} \quad (4)$$

采用公式(2)得到压力影响下的泄漏量一阶导数与二阶导数曲线,如图8所示。从图8(a)中能够看出泄漏量对压力的一阶导数在0MPa处最大为

40.244, 在0.6MPa处最小为-0.695, 表明在低压启动阶段泄漏量对压力的变化极为敏感, 而在0.6MPa处出现负敏感区, 0.6~0.85MPa的高压范围泄漏量对压力变化敏感度较低。从图8(b)中能够看出泄漏量对压力的二阶导数在0.57~0.62MPa范围内出现剧烈波动, 最大值为258.633, 最小值为-350.28, 变化幅度约为609.943。该振荡幅值约为其他压力区间

(如0.3~0.5 MPa)二阶导数变化幅度的15~20倍。物理上, 一阶导数反映泄漏量对压力的敏感度, 二阶导数则表征该敏感度的变化速率(即敏感度的“加速度”)。当二阶导数剧烈正负交替且幅值远高于其他区间时, 意味着微小的压力扰动即可导致敏感度方向与大小的快速逆转, 系统处于临界失稳状态。

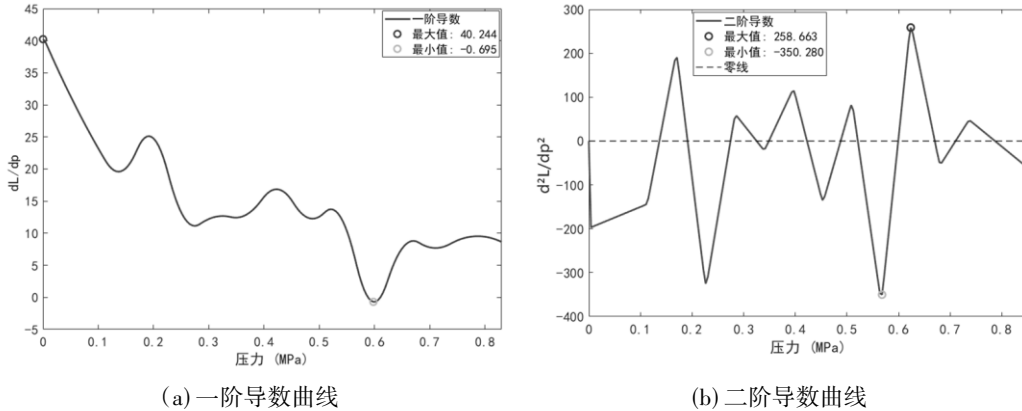


图8 受压力影响的泄漏分析曲线

Fig.8 Leakage analysis curve affected by pressure

采用公式(3)得到转速影响下的泄漏量一阶导数与二阶导数曲线, 如图9所示。从图9(a)中能够看出一阶导数整体数值很小, 最大为0.001560, 最小为-0.001685, 说明泄漏量对转速的变化极其不敏感, 从图9(b)中二阶导数也非常小, 最大为0.000002, 最小为-0.000012, 说明泄漏量对于转速的敏感度变化

也处于很平缓的状态。整体能够看出转速对泄漏量的影响微弱, 与压力影响相比可忽略不计, 说明新型自冲击密封结构对转速变化具有固有稳定性, 其在0到8000rpm的转速范围内, 泄漏量敏感度变化趋势平稳, 系统响应线性化特征明显。

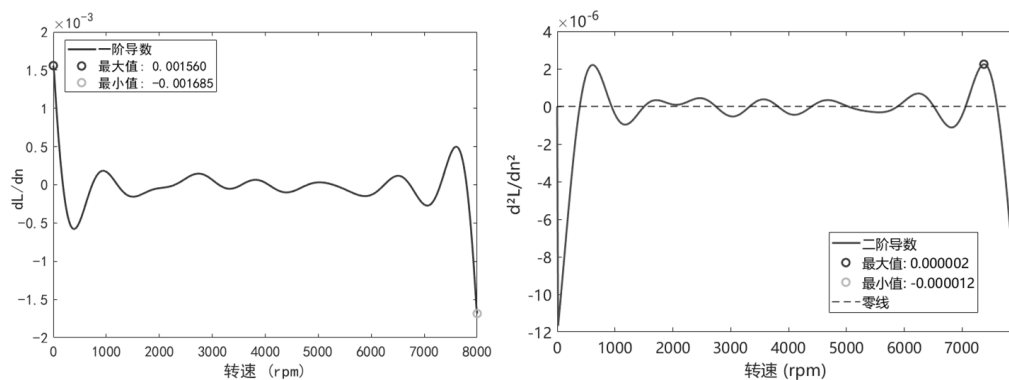


图9 受转速影响的泄漏分析曲线

Fig.9 Leakage analysis curve affected by speed

注:(a) 一阶导数曲线 (b) 二阶导数曲线

为了更直观对比两种工况对于泄漏量的影响程度, 将不同工况参数对应的导数值取绝对值作为敏感性指数, 将变工况影响的泄漏量曲线与一、二阶导数曲线画在同一坐标系内, 如图10所示。从图

10(a)中能够看出泄漏量对压力的响应在整个工况域内差异显著, 在不同压力下, 泄漏量对压力变化的响应规律不一致, 说明压力工况下较难建立统一的控制策略, 故该工况下的可靠性优化设计是重中

之重。从图 10(b)中能够看出在整个转速范围内,泄漏量对转速的响应高度一致,基于部分工况数据即

可准确预测全工况响应,说明转速工况影响下的密封结构可靠性极佳。

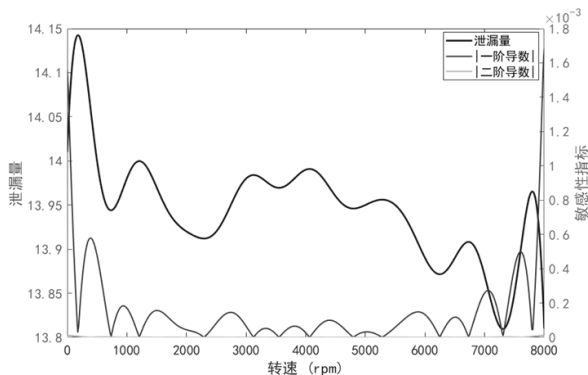
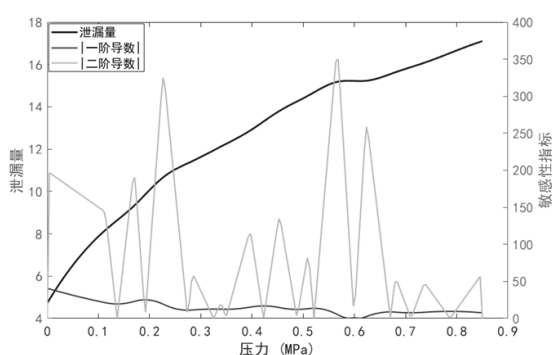


图 10 不同工况下泄漏敏感性分析

Fig.10 Sensitivity analysis of leakage under different working conditions

注:(a) 压力条件敏感性分析 (b) 速度条件敏感性分析

为了定量评估变工况参数对于泄漏量的稳定性影响,通过公式(4)计算两种工况影响下的稳定性指标 S ,得到压力工况影响的 S 为 0.004003,转速工况影响的 S 为 0.99。同时基于分析结构,提出了变工况影响的泄漏系统稳定性等级评估,如表 2 所示。

表 2 变工况影响的泄漏系统稳定性等级评估

Table 2 Assessment of stability level of leakage system affected by variable operating conditions

可变 工况	参数范围	稳定性等级	敏感度
压力	0–0.30 MPa	中等稳定性 ($0.5 < s \leq 0.8$)	高敏感度但变化平缓
	0.30–0.57 MPa	低稳定性 ($0.1 < s \leq 0.5$)	敏感度变化开始加剧
	0.57–0.62 MPa	极低稳定性 ($s \leq 0.1$)	二阶导数剧烈振荡
	0.62–0.85 MPa	中等稳定性 ($0.5 < s \leq 0.8$)	显著的敏感度波动
转速	0–8000 rpm	高稳定性 ($0.8 \leq s$)	低敏感度

本文所得“转速在 0–8000 rpm 范围内对泄漏量影响微弱”的结论,严格基于常温、单一密封间隙、仅以泄漏量为评价指标的实验条件。当转速进一步提升(如超临界转速)或计入热–力耦合效应(如离心变形、热膨胀改变密封间隙)时,转速的影响可能不可忽略。

3 压力主导下的自冲击密封可靠性分析

前文的稳定性分析结果已经证明,压力是导致新型密封结构不稳定、响应非线性和不可预测性的主导因素,尤其是在 0.57–0.62 MPa 的临界区域,而

转速工况则表现出极高的稳定性。故本节将压力工况下泄漏响应的非线性与不稳定特征,转化为对系统服役可靠性的定量评估,并据此提出以提升可靠性为目标的稳健性设计准则与优化策略,为高可靠性自冲击密封的设计与运行提供直接理论依据。

3.1 基于压力–泄漏稳定性特征的可靠性映射模型

本模型的核心是将压力工况下的泄漏响应不稳定性量化为系统可靠度的衰减函数,模型输入为压力 P ,输出为该压力点对应的瞬时可靠度 $R(p)$ 。构建从稳定性到可靠性的映射模型首先定义关键不稳定因子^[34]。基于一阶导数方差 $\text{Var}(dL/dp)$,定义全局不稳定因子 α_c ,如公式(5)所示。该参数表征系统响应的不可预测性。式中 K 表示归一化常数,用于将方差无量纲化。

$$\alpha_c = \frac{\text{Var}(dL/dp)}{K} \quad (5)$$

基于压力影响泄漏量的二阶导数 d^2L/dp^2 剧烈震荡区间 $I_c = [0.57, 0.62]$ MPa,定义局部脆弱因子 β_L ,如公式(6)所示。该参数表征临界区高度敏感性,式中 γ 表示脆弱性系数,用于调整参数量级, $I_c(p)$ 表示指示函数,当压力 $P \in I_c$ 时,该值取 1,否则取 0,这表示脆弱性只在临界区内被显著激活。设置该指示函数的意义是因为在该区间内,系统敏感度的变化率极大,微小的压力波动都会导致 dL/dp 发生剧烈变化,系统处于“临界失稳”状态,脆弱性极高。

$$\beta_L = \gamma \cdot \left| \frac{d^2L}{dp^2}(p) \right| \cdot I_c(p) \quad (6)$$

3.2 不同压力区间可靠度定性分析

结合第 3 节中的泄漏量非线性增长和稳定性分

析结果,分析表2中不同压力区间范围内的可靠性特征。在低压区[0–0.3]MPa,此时在启动阶段泄漏量敏感度高,泄漏量随压力快速攀升。可靠性随压力增加而缓慢下降;在中压区[0.3–0.57]MPa,敏感度开始下降但变化加剧,泄漏量进入快速增长通道。可靠性加速衰减;在临界区[0.57–0.62]MPa,此时脆弱因子 β_L 起主导作用,二阶导数剧烈震荡,微扰即可引发泄漏量跳跃或异常减小,行为高度不可预测。可靠性存在“断崖式”下降风险;在高压区[0.62–0.85]MPa,敏感度波动明显,泄漏量维持在高位(试验样本的平均值为17.1m³/h),该区间内长期运行可能导致密封面磨损、热失效等衍生故障,可靠性维持在较低水平。

3.3 风险概率与可靠度函数关系模型

定义密封系统稳定性的不可靠度 $F(p)$ 为压力 P 下,系统不因“不稳定因子”导致的泄漏量突变而失效的概率(即稳定性可靠度)。采用应力–强度干涉模型进行可靠性建模,不可靠度函数与可靠度函数如公式(7)所示^[35–37]。式中 $\mu_s(p)$ 表示与压力成正比的基础应力(如 $\mu_s(p) = k \cdot p$),其中 k 表示应力–压力的比例系数, $\alpha_G \cdot \sigma_{s,G}$ 表示全局不稳定因子引入的应力随机分量, $\beta_L(p) \cdot \sigma_{s,L}$ 表示局部脆弱因子在临界区引入的应力尖峰,假设密封系统的固有抗干扰能力服从正态分布 $r \sim N(\mu_r, \sigma_r^2)$ 。

$$F(p) = P(r < S(p)) = \Phi\left(\frac{\mu_s(p) + \alpha_G \cdot \sigma_{s,G} + \beta_L(p) \cdot \sigma_{s,L} - \mu_r}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_{s,G}^2 + \sigma_{s,L}^2}}\right)$$

$$R(p) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_s(p) + \alpha_G \cdot \sigma_{s,G} + \beta_L(p) \cdot \sigma_{s,L} - \mu_r}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_{s,G}^2 + \sigma_{s,L}^2}}\right) \quad (7)$$

由于工程中没有对于稳定性失效的判断依据,因此在参数估计中无法使用最大似然估计等方法,但是根据4.2中的可靠度定性分析结果能够看出在临界区[0.57–0.62]MPa,系统的可靠度会显著下降,而其他区域可靠度相对较高,故可以设定参数初始值,然后基于可靠度曲线拟合的最小二乘法进行参数标定^[38]。模型参数初始值设定如表3所示。

表3 模型参数初始值

Table 3 Initial values of model parameters

参数	k	μ_r	σ_r	$\sigma_{s,G}$	$\sigma_{s,L}$	γ
初始值	25	20	3	1	0.8	0.01

根据3.1节中的RBF泄漏量数据及4.2节中的可靠性分析结果,设定随压力工况变化的目标可靠度曲线,并进行平滑度处理。根据目标可靠度曲线设定低压区、中压区、临界风险区与高压区,其中临界风险区间[0.57–0.62]MPa与第3节中的二阶导数剧烈震荡区间完全吻合。目标可靠度与初始参数可靠度对比如图11所示。压力影响的泄漏量数据是可靠性模型参数估计的重要来源,目标可靠度曲线很好地模拟了4.2节中的可靠性变化过程,并且临界风险区的标定也证明密封系统的脆弱性在此区间被激活,为后续可靠性优化提供了精准靶点。

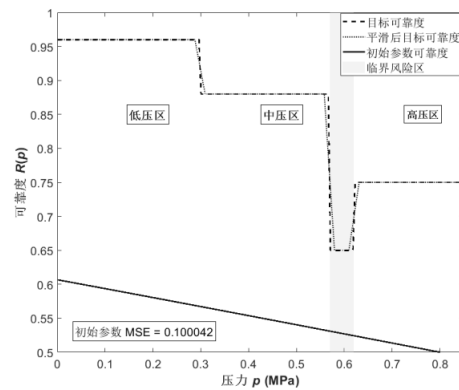


图11 目标可靠度与初始参数可靠度对比

Fig.11 Comparison between target reliability and initial parameter reliability

采用基于可靠度曲线拟合的最小二乘法进行参数标定,优化过程收敛良好,优化前后可靠性曲线对比如图12所示。从图12中能够看出,优化算法在48次迭代后稳定收敛,最终均方误差降低67.56%,表明参数标定过程有效提升了模型的拟合精度,收敛稳定,并且函数调用次数为346次,计算效率良好。表3中的初始参数都进行了优化,参数优化结果如图13所示,从图13中能够看出,优化后的参数更能反映系统的真实物理特性。比如其中的应力–压力比例系数 k 优化值为15.0004,大约降低40%,这表明自冲击密封系统抵抗压力扰动的鲁棒性被低估,这为放宽压力控制精度要求提供了依据;强度均值 μ_r 优化值为24.999,大约增加25%,这表明密封系统的实际承载能力高于设计预期;全局应力波动参数 $\sigma_{s,G}$ 优化值为0.5,大约降低50%,这表明系统响应的不可预测性主要来源于特定工况,而非全程随机。

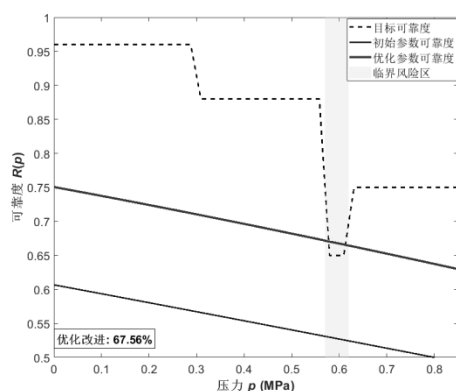


图12 优化前后可靠性曲线对比

Fig.12 Comparison of reliability curves before and after optimization

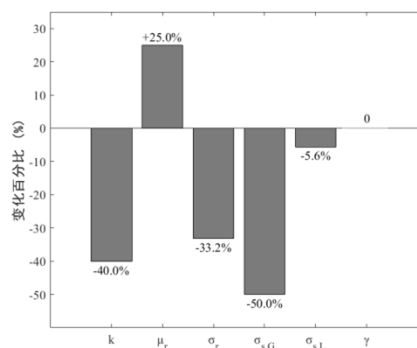
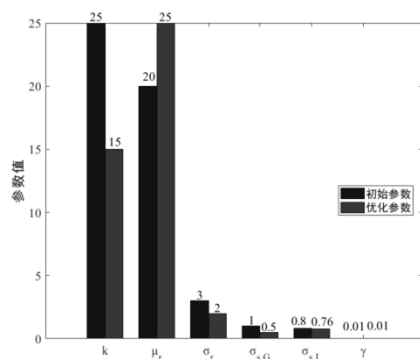


图13 参数优化结果

Fig.13 Comparison of Parameter Optimization Results

注:(a) 参数值比较 (b) 参数值变化率

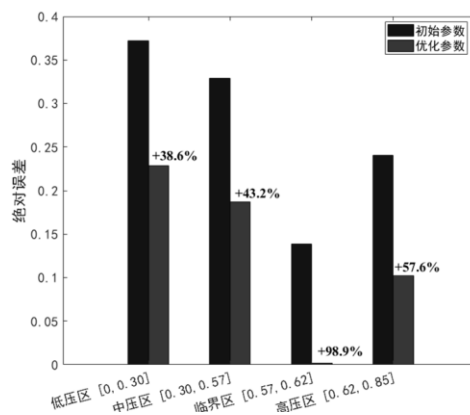
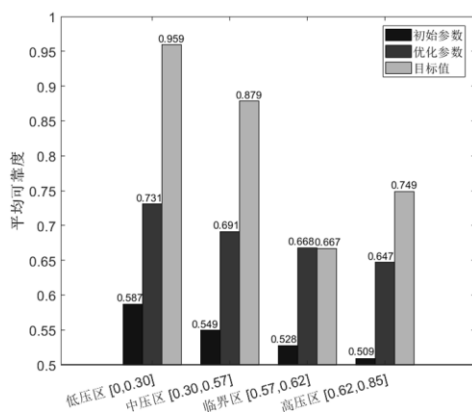


图14 压力分区的可靠性分析

Fig.14 Reliability analysis of pressure zoning

注:(a) 可靠度对比 (b) 拟合误差对比

3.5 考虑功能失效的综合可靠性分析

设定一个固定的功能失效阈值 $\eta_{\max}$, 该参数表示密封系统允许的最大相对泄漏量。根据第3节中

3.4 可靠度曲线拟合效果评估

根据上节划分的压力区间, 定量对比图12中的三种可靠度曲线, 对比结果如图14所示。从图14中能够看出在低压[0–0.30]MPa与中压[0.30–0.57]MPa区域拟合质量过于保守, 高压区域[0.62–0.85]MPa拟合趋势正确, 数值略有偏差, 结果表明密封系统在这些压力区间内可靠性高于预测结果, 可以为安全裕度设计提供保障。在风险最高的临界区[0.57–0.62]MPa, 模型实现了近乎完美的拟合(误差仅0.0016), 也验证了基于二阶导数识别临界区的有效性。近乎完美的拟合是指可靠性模型对临界区失效概率的预测精度, 而非系统在该区间的运行稳定性, 该定义与稳定性指标S两者分别从预测精度与物理稳定性两个维度评价系统行为。

的数据可知, 在压力0到0.85MPa区间内, 泄漏量增长了262.29%。若设定 $\eta_{\max}=150\%$, 该值表示相对泄漏量超过150%即认为密封发生功能失效。这一阈

值的确定依据主要参考 API 682 标准中对于非接触式密封的泄漏量限值建议,并结合本密封应用场景(如化工压缩机轴端)的企业设计要求,允许最大泄漏量约为初始泄漏量的 2.5 倍,保守取 150% 作为失效门槛,则对应的压力阈值 P_{fail} 约为 0.68 MPa,超过该阈值则视为功能失效。现用标定的可靠性模型,在考虑泄漏量突变失效概率的基础上,结合泄漏量

功能失效概率进行综合分析,结果如图 15 所示。从图 15 能够看出功能失效阈值位于高压区末端,恰在临界危险区之后,这说明系统先经历临界区的稳定性危机,随后才达到功能失效阈值,这表明稳定性失效是更紧迫的风险,应在泄漏量超标前予以控制,而功能失效阈值与临界区间存在约 0.06 MPa 的安全裕度,为控制策略提供了响应时间窗口。

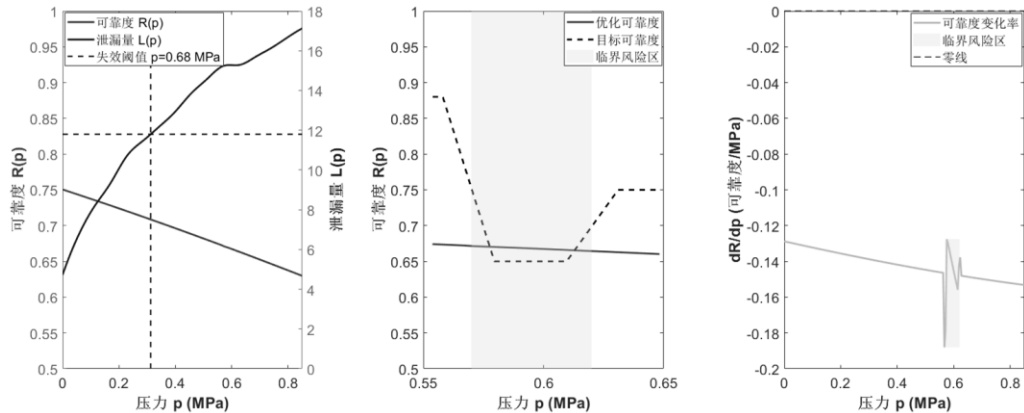


图 15 综合可靠性分析

Fig.15 Comprehensive reliability analysis

注:(a)综合可靠度 (b)临界区可靠度放大图 (c)可靠度变化率

4 面向动态稳定性的可靠性优化设计

4.1 压力分区运行准则

上节中发现密封系统在 0.57–0.62 MPa 压力区间具有临界失稳特性,此处需要制定主动规避策略。并且基于图 15 中的可靠性分布特征,需要对新型密封系统制定差异化运行规程。压力分区运行

策略如图 16 所示。从图 16 中能够看出 0–0.5 MPa 压力区间为可以长期连续运行的安全区,0.5–0.55 MPa 压力区间为需要限时运行的谨慎运行区,0.55–0.64 MPa 压力区间内为风险规避区,较理论临界区 0.57–0.62 MPa 两侧各扩展 0.02 MPa 的安全裕度,当工况要求必须在该区间内时,应执行快速穿越控制。当压力大于 0.62 MPa 时,此时为危险区,应尽量避免在该工况下运行。

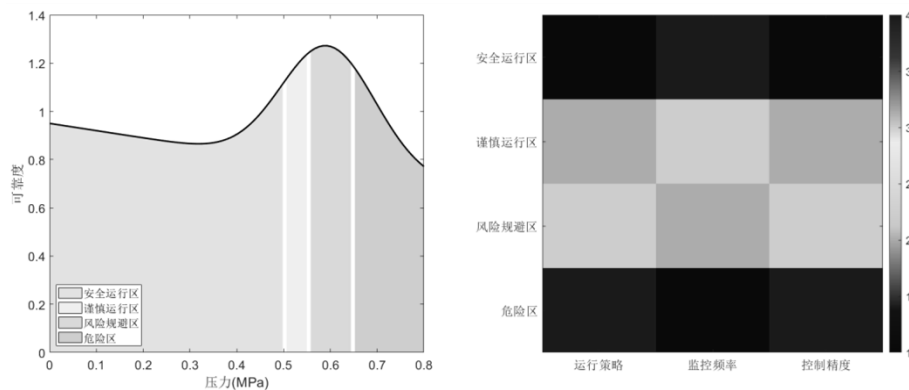


图 16 压力分区运行准则

Fig.16 Pressure zoning operation strategy

注:(a)压力区的可靠性分布 (b)分区运行准则矩阵

4.2 参数敏感性设计准则

针对第4节中揭示的关键敏感性参数,通过结构与材料设计可以降低系统对变工况扰动的响应敏感度。图17展示了 k 与 $\sigma_{s,G}$ 关键敏感性参数与系统可靠度之间的复杂映射关系。图17(a)中能够看出随着 k 与 $\sigma_{s,G}$ 的增大,表明系统的压力敏感度与全局不确定性增加,可靠度呈降低趋势,并且曲面非平面,存在扭转区域,这表明 k 与 $\sigma_{s,G}$ 存在交互作用,

k 较小时, $\sigma_{s,G}$ 变化对可靠度影响更显著。图17(b)中能够看出从红点斜向左下方延伸至绿点的路径是参数优化的最佳方向,此时优化步长 $\Delta k=-0.3$, $\Delta \sigma_{s,G}=-0.2$ 。可靠度增益 $\Delta R \approx +0.15$ 。该可靠性设计准则为关键敏感参数提出了最佳调整轨迹,并且标出了参数的可行性边界,确保了可靠性优化方案的可行性。

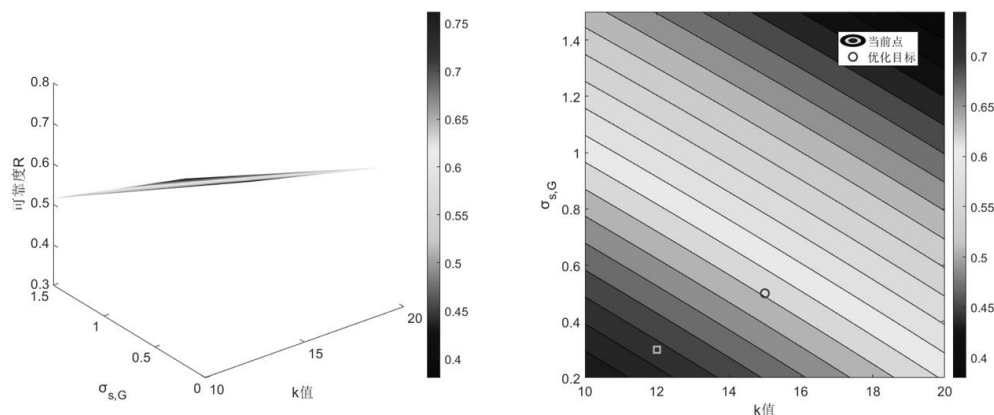


图17 关键灵敏度参数与可靠性的映射关系

Fig.17 The mapping relationship between key sensitivity parameters and reliability

注:(a) 参数-可靠性响应面 (b) 参数优化路径示意图

5 结论

本文提出了一种融合连续动态分析、稳定性量化与可靠性映射的系统性方法,用于评估与优化变工况下新型自冲击密封的泄漏稳定性,主要结论归纳如下:

(1)工作介质压力是影响密封泄漏性能的主导因素,泄漏量随压力呈非线性显著增长,且在0.57–0.62 MPa区间内存在“临界失稳”特征,系统稳定性急剧下降。相比之下,转速在0–8000 rpm范围内变化对泄漏量的影响微弱,表明该密封结构对转速变化具有固有稳定性。

(2)成功构建了覆盖全工况域的连续性能响应模型,实现了对密封动态稳定性的精细化定量评估。基于动态不稳定性的可靠性映射模型,能够准确反映系统可靠度随压力变化的衰减规律,尤其在临界失稳区间内拟合良好,为从物理响应到概率可靠度的跨域关联提供了可行路径。

(3)凝练提出了“压力分区运行”与“参数敏感性设计”两条核心准则。前者明确了包括“安全区”、“谨慎运行区”、“风险规避区”和“危险区”的差

异化运行策略;后者指明了通过降低系统压力敏感性与全局不确定性来提升可靠性的关键参数优化方向。这两条准则为高可靠性自冲击密封的工程设计、安全运行与维护提供了直接的理论依据与实践指引。

本研究建立的一套从实验测试、连续动态建模、稳定性量化评估到可靠性映射与优化设计的系统方法,不仅解决了特定新型密封的评估与设计难题,其核心思路与流程也为其他面临非线性、时变工况的复杂机械系统的稳定性分析与稳健性设计提供了可借鉴的方法论参考。

参考文献

- [1] Zhang J, Li Q, Zhang C, et al. High-temperature sealing performance and structure optimization of rubber core for conical blowout preventer[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, **234**:212606.
- [2] Zhang W, Huang W, Lin H, et al. Analysis of erosion and sealing characteristics of V-regulating ball valves for coal chemical industry[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2024, **77**(9): 1580–1592.
- [3] 郑思敏,滕黎明,赵文静,等. 交变工况下深海装备机械密封端面温升和磨损特性[J]. *上海交通大学学报*, 2023, **57**(8):948–962.

- Zheng Simin, Teng Liming, Zhao Wenjing, etc Temperature rise and wear characteristics of mechanical seals on deep-sea equipment under alternating working conditions [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, **57** (8): 948–962.
- [4] 徐鲁帅,王赞磊,张帆,等. 扰动工况下不同表面结构机械密封瞬态特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2020, **54**(1): 56–63.
- Xu Lushuai, Wang Yunlei, Zhang Fan, etc Transient characteristics analysis of mechanical seals with different surface structures under perturbation conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, **54** (1): 56–63.
- [5] 胡斌臣,赵有磊,巩浩,等. 金属密封圈泄漏率仿真计算与密封可靠性分析[J/OL]. 中国表面工程, 1–12 [2026–06–03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3905.TG.20250814.0958.002>.
- Hu Binchen, Zhao Youlei, Gong Hao, etc Simulation calculation and sealing reliability analysis of metal sealing ring leakage rate [J/OL]. China Surface Engineering, 1–12 [2026–06–03] <https://link.cnki.net/urlid/11.3905.TG.20250814.0958.002>.
- [6] Wu S, Gong H, Yu L, et al. Physics-informed dynamic Bayesian networks for time-dependent reliability prediction of subsea wellhead sealing system with multi-states[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, **162**: 112492.
- [7] Zhou Y Q, Feng H S, Zhuang M, et al. Reliability assessment of metal C-ring sealing performance for CFETR torus cryopump main valve[J]. Vacuum, 2025, **233**: 113930.
- [8] Xu H, Liu H, Li Q, et al. Structural and sealing health monitoring of subsea watertight connectors using embedded fiber Bragg grating sensors[J]. Measurement, 2026, **258**: 119367.
- [9] 薛婷,王瑜,张凯,等. 非接触式端面密封流体动压效应的研究进展[J]. 钻探工程, 2023, **50**(S1): 38–43.
- Xue Ting, Wang Yu, Zhang Kai, etc Research progress on fluid dynamic pressure effect of non-contact end face seal [J]. Drilling Engineering, 2023, **50** (S1): 38–43.
- [10] Ding M, Zhang X, Zhang X, et al. Considering labyrinth type seals in dynamic response of heavy-duty gas turbine by full length equivalent model: Influence of different seals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2026, **256**: 114522.
- [11] Zhang Z, Ding X, Xu J, et al. A study on building and testing fractal model for predicting end face wear of Aeroengine's floating ring seal[J]. Wear, 2023, **532–533**: 205079.
- [12] Guo J, Li M, He Y, et al. A systematic review of supercritical carbon dioxide(S-CO₂) power cycle for energy industries: Technologies, key issues, and potential prospects[J]. Energy Conversion and Management, 2022, **258**: 115437.
- [13] Chen Y, Zhuo Z, Li Y, et al. Prediction of spiral groove dry gas seal performance and intelligent optimization of structural parameters[J]. Tribology International, 2024, **193**(000).
- [14] Zeng Q F, Deng Z, Li J, et al. Advances in magnetic fluid seal and structures[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, **603**(000): 17.
- [15] Li L, Li D, Guo Y. Enhancing the sealing pressure tolerance in magnetic fluid seal by switchable oleophobic-oleophilic wettability on a rotary shaft[J]. Vacuum, 2026, **246**: 115052.
- [16] Li L, Guo Y, Qi Z, et al. The sealing pressure variance originated from volume of ferrofluids in magnetic fluid seal[J]. Tribology International, 2024: 200.
- [17] 王衍,谢雪非,徐慧,等. 新型非接触式自冲击密封结构设计 with 性能分析[J]. 机械工程学报, 2023, **59**(15): 204–215.
- Wang Yan, Xie Xuefei, Xu Hui, etc Design and Performance Analysis of a New Non Contact Self Impact Sealing Structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, **59** (15): 204–215.
- [18] 王衍,黄周鑫,何一鸣,等. 新型自冲击密封的泄漏特性与密封机理初探[J]. 摩擦学学报, 2023, **43**(11): 1330–1340.
- Wang Yan, Huang Zhouxin, He Yiming, etc A preliminary study on the leakage characteristics and sealing mechanism of a new type of self impact seal [J]. Journal of tribology, 2023, **43** (11): 1330–1340.
- [19] 王衍,沈豆豆,陈妙妙,等. 自冲击密封热-力耦合特性及其冷却结构设计研究[J/OL]. 化工学报, 1–18 [2026–06–03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1946.TQ.20260513.1817.008>.
- Wang Yan, Shen Doudou, Chen Miaomiao, etc Research on the Thermal Mechanical Coupling Characteristics and Cooling Structure Design of Self Impact Seals [J/OL]. Journal of Chemical Engineering, 1–18 [2026–06–03] <https://link.cnki.net/urlid/11.1946.TQ.20260513.1817.008>.
- [20] 冯聪,王衍,张家浩,等. 基于自冲击密封参数敏感性的节流效率可靠性研究[J/OL]. 摩擦学学报(中英文), 1–20 [2026–06–03]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1224.04.20260106.1827.004>.
- Feng Cong, Wang Yan, Zhang Jiahao, etc Reliability Study of Throttle Efficiency Based on Sensitivity of Self Impact Sealing Parameters [J/OL]. Journal of Tribology (Chinese and English), 1–20 [2026–06–03] <https://link.cnki.net/urlid/62.1224.04.20260106.1827.004>.
- [21] 王泽,胡琼,陈雅静,等. 液体自冲击密封泄漏特性、密封机理与优化设计[J]. 化工学报, 2025, **76**(8): 4194–4204.
- Wang Ze, Hu Qiong, Chen Yajing, etc Leakage characteristics, sealing mechanism and optimization design of liquid self impact seal [J]. Journal of Chemical Engineering, 2025, **76** (8): 4194–4204.
- [22] Wu S, Zhang L, Liu T, et al. A Machine learning-based framework for reliability prediction of metallic seals with manufacturing-induced dimensional uncertainties[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2026, **269**: 112062.
- [23] Liu S, Ben-Abdelwahed A, Sommier A, et al. Experimental investigation of leakage flow measurement and surface morphology in small-scale liquid mechanical seals[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2025, **106**: 102957.
- [24] Cardoso V E M, Ramos N M M, Almeida R M S F, et al. Reliability of quantitative and qualitative assessment of air leakage paths through reductive sealing[J]. Building and Environment, 2020, **183**: 107151.
- [25] Liu W, Yun F, Ju M, et al. The reliability assessment method for sealing structure of subsea horizontal clamp connector based on sealing and strength[J]. Ocean Engineering, 2024, **311**: 118938.
- [26] 刘海洋,马佳,王森,等. 特斯拉阀单向导通性研究[J]. 物理与工程, 2020, **30**(1): 120–124.
- Liu Haiyang, Ma Jia, Wang Sen, etc Research on Unidirectional Conductivity of Tesla Valve [J]. Physics and Engineering, 2020, **30** (1): 120–124.
- [27] Zhang Y, Xiao Q, Zhang G, et al. Evaluation of radial basis function selection and parameter optimization in cell-based smoothed radial point interpolation method for underwater acoustic prediction[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2025, **180**: 106499.
- [28] 柴杰,江青茵,曹志凯. RBF神经网络的函数逼近能力及其算法

- [J]. 模式识别与人工智能, 2002, **15**(3): 310–316.
- Chai Jie, Jiang Qingyin, Cao Zhikai The Function Approximation Ability and Algorithm of RBF Neural Network [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, **15** (3): 310–316.
- [29] Kumar S, Dwivedy S K. Assessment of reaching laws for linear and nonlinear sliding surfaces: Improving performance of pipe crack sealing manipulator[J]. Expert Systems with Applications, 2026, **296**: 128935.
- [30] Liu X, Guo S, Guo Y, et al. Nonlinear dynamic responses of wing flexible sealing undergoing flapping effect[J]. Aerospace Science and Technology, 2026, **168**: 110779.
- [31] Zheng C, Zheng X, Qin J, et al. Nonlinear finite element analysis on the sealing performance of rubber packer for hydraulic fracturing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, **85**: 103711.
- [32] Feng C, Yang Z, Chen C, et al. Quantitative evaluation method for machining accuracy retention of CNC machine tools considering degenerate trajectory fluctuation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022(6): 36.
- [33] Velazquez L. Curvature of fluctuation geometry and its implications on Riemannian fluctuation theory[J]. Journal of Physics A Mathematical & Theoretical, 2013, **46**(34).
- [34] Zhou D, Han J, Chen Z, et al. Dynamic reliability assessment for motion stability of industrial robot based on high-order response moments[J]. Measurement, 2025, **246**: 116690. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116690>.
- [35] Huang H Z, An Z W. A Discrete Stress–Strength Interference Model With Stress Dependent Strength[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, **58**(1): 118–122.
- [36] Ye K, Wang H, Ma X. A generalized dynamic stress–strength interference model under δ –failure criterion for self-healing protective structure[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, **229**: 108838.
- [37] Olatubosun S A, Zhang Z. Dependency consideration of passive system reliability by coupled stress–strength interference/functional relations of parameters approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, **188**: 549–560.
- [38] Wang J, Xu G, Zhou J, et al. PAKP: Parallelized Adaptive Kriging method with Partial least squares for high-dimensional reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2026, **265**: 111476.