DOI: 10.3901/JME.2021.03.116

机械密封智能化的技术基础和发展趋势*

尹 源¹ 黄伟峰¹ 刘向锋¹ 刘 莹¹ 王玉明¹ 李 鲲²

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084;

2. 合肥通用机械研究院有限公司 合肥 230031)

摘要: 机械密封的智能化是装备智能化中不可或缺的关键环节之一,也是有效解决高端装备机械密封现有问题、发展机械密封新功能的迫切需要和战略性发展方向。针对机械密封本身的机理和技术特征,对机械智能化的理念进行了阐述。从智能型机械密封需要具备的感知、分析和行动三个能力维度,综述了机械密封智能化的现有技术手段和面临的困难。在机械密封智能化的未来发展中,尽管增量式设计方法可能更容易取得初步成果,但从长远来看需要突破非智能化条件下的经典结构的限制,采用系统层面的整体设计方法。可以预期,深度交互、高度自治的智能型机械密封将对密封技术进步和装备智能化产生重要价值。

关键词: 机械密封; 智能装备; 可靠性; 摩擦学; 人工智能

中图分类号: TB42; TH117

The State-of-the-art and Future Development of Mechanical Face Seal Intelligentization

YIN Yuan¹ HUANG Weifeng¹ LIU Xiangfeng¹ LIU Ying¹ WANG Yuming¹ LI Kun²

(1. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031)

Abstract: The intelligentization of mechanical face seals plays an infrastructural role in the intelligentization of equipment, and also the strategical solution for the existing requirements and future innovations is developed. Based on the specific physical mechanisms and technical features of mechanical face seals, the concept of mechanical face seal intelligentization is elaborated. By the three capability aspects of perceiving, analyzing and acting, the existing techniques of the mechanical face seals and their dilemmas are reviewed. An incremental design method may have good early agility for the development of intelligent mechanical face seals; however, a systematical design method which goes beyond the traditional design patterns developed without consideration for intelligentization shall perform better in the long term. It can be expected that the intelligent mechanical face seals with deep interactivity and high autonomy will greatly boost the advancement of sealing technology and equipment intelligentization.

Key words: mechanical face seals; intelligent equipment; reliability; tribology; artificial intelligence

0 前言

由于工业应用对性能的要求日益提高,也基于日新月异的技术提供的条件,机械装备的智能化作为一个新的发展方向而受到日益广泛的关注。2011年德国在汉诺威工业博览会上提出“工业 4.0”^[1]概念,旨在利用信息技术促进产业变革。2015年,中国国务院印发《中国制造 2025》^[2],部署全面推

进制造强国战略。其在“战略任务和重点”中要求“推进信息化与工业化深度融合”,尤其是“将智能化作为两化融合的主攻方向”,“着力发展智能装备和智能产品,推进生产过程智能化,培育新型生产方式,全面提升企业研发、生产、管理和服务的智能化水平”。2018年,党的十九大报告要求“加快发展先进制造业,推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合”^[3],为中国制造业的智能化指明了方向,提供了广阔的舞台。

“智能”是一个高度抽象的概念,它的具体表现形式与所处领域有着非常密切的关系。具体到机械

* 国家重点研发计划(2018YFB2000800)和国家自然科学基金(51735006, U1737202)资助项目。20200218 收到初稿,20200509 收到修改稿

装备及部件中,“智能”的特征则通常因其主体的不同而各有侧重。

(1) 高金吉等^[4]提出了流程工业智能化的概念,认为需要对设备运行状态进行实时健康诊断和能效调控。其更具体的实例则体现在压缩机的智能化概念中,包括监测、故障诊断、自愈和自优化等实时测控功能特征^[5-9]。

(2) 杨华勇^[10-13]对工程机械的智能化进展及发展趋势做了详细的阐述。其认为工程机械的智能化体现在网络化、感知、分析、决策和控制五个方向上,并且依次经历四个发展阶段:面向传感器辅助、分级规划和自动控制;面向单一环节自主作业;面向全通用自主作业;面向集群智能化作业。

(3) 轴承领域被提及的“智能”多仅用于形容故障诊断方法(而非整个轴承系统),尤其强调其在处理信号过程中的适应性及对机器学习技术的引入^[14-17]。少数研究借助功能材料尝试为轴承设计主动改变力学特性的功能^[18]。

(4) 机械密封领域也已有少量文献提及“智能”概念——与轴承领域类似,“智能”的提法被用来形容特定的环节,包括“智能化状态监测系统”^[19]和“智能控制系统”^[20],但未作系统层面上的阐述。

1. 组合故障 2. 滚动体故障
3. 正常故障 4. 内圈故障

(c) 一种轴承智能诊断方法^[15]

(d) 机械密封的智能化状态监测系统^[19]

图 1 各种机械装备中的“智能”实例

(a) 压缩机中针对特定故障的自愈系统^[5]

未来基于人工智能和网络集群无人操作模式

智能工程机械是未来发展趋势

(b) 智能工程机械^[13]

1 机械密封智能化的意义与特征

1.1 机械密封概述

机械密封是一种旋转密封形式,其利用介质压力和弹性元件的作用使两相对运动的密封环端面相互贴合,且不发生过强的接触摩擦(或不发生接触摩擦),从而在限制泄漏的同时具有较长的工作寿命。

机械密封因其优异的性能得到了广泛的应用。有 86% 以上的石化工艺装置机泵采用机械密封^[21]。作为设备辅助系统的关键零部件,机械密封对主机的稳定、高效运行具有决定性作用^[21-26]。报告指出机械密封设计与制造技术是当前流体传动与控制领域的发展重点之一^[27]。

1.2 机械密封智能化的重要意义

1.2.1 判断机械密封状态的迫切需要

根据对文献和企业的调研,实践中机械密封面临如下问题。

(1) 寿命难以预测。机械密封的寿命呈现出较广的随机分布^[23],寿命预测手段的缺乏使得机械密封需要频繁地维护^[28]。

(2) 故障诊断困难。在无法判断故障根源时,只能简单地更换密封,而不能进行更有针对性的处理,导致类似的故障仍然可能重复出现^[22]。

(3) 突发性失效。即使经过基于现有技术的检查且并未经过长时间运行,机械密封仍可能毫无征兆地发生失效^[23],导致安全性难以保证。

(4) 过大的安全裕量。目前的工程实践中,通常依据管路中的介质参数设计报警和连锁停机阈值,由于这些参数对密封运行风险的体现不够准确,从而不得不需要较大的安全裕量,导致非必要的停机。

然而,非必要的和非计划的主机停机会造成巨大的经济损失,后者甚至可能引发人身安全事故。因此,机械密封的用户迫切地希望产品提供这样的功能:能够对自身的异常状况做出判断,并在此基础上准确地预估失效风险和剩余寿命;在故障已经发生时则做出正确的诊断。

1.2.2 实时调控可为机械密封带来的性能提升

传统的机械密封一旦完成安装,能对其进行干预就非常有限。实时调控的引入可为机械密封赋予更多新的功能,为机械密封提供了潜在的发展空间。

(1) 通常,机械密封的设计只能针对相对较窄的工况进行,因此对工况变化的适应性较差。另一方面,制造与装配误差和密封服役过程中部件的性能劣化也很容易影响机械密封的性能。如果机械密封的状态可以在线调节,它们就能适应更宽的工况、

更大的误差、和更严重的部件劣化。

(2) 实时调控亦能为机械密封带来应急保障能力的提升。在发生或即将发生严重事故时,机械密封可以迅速执行特定的应急反应预案,来尽可能缓和事故后果。例如,在被密封物料具有较高危险性的场合,可令机械密封在发现物料过量泄漏时迅速用较大的闭合压力压紧端面,为疏散人员、切断管路等应急工作争取时间。

(3) 可通过调节机械密封状态来主动收集状态分析所需要的多样化的、甚至是针对性的信息。例如,将机械密封暂时地调整到易于暴露特定潜在故障形式的状态下,以判断该故障是否存在。

1.2.3 机械密封智能化的基础性地位

作为辅助系统的关键部件,机械密封的智能化是主机智能化的基础。例如,当主机需要判断其自身状态或进一步做出决策时,与作为可靠性短板之一^[23, 25]的机械密封有关的信息无疑是不可或缺的。从宏观上不难发现,包括机械密封在内的关键零部件的智能化最终在智能制造体系中占据基础性地位。

1.3 智能型机械密封的功能与效果特征

尽管人们对于“智能”有着基本相同的一般印象,但过于宽泛的概念对于指导机械密封智能化的发展并无实际益处。本文从机械密封特有技术的角度来具体描述其“智能”的涵义,分三个功能维度进行阐述(见图 2)。

图 2 智能型机械密封的功能

(1) 感知: 即从物理系统获取数据。智能型机械密封能借助传感器来监测与自身工作状态或环境相关的物理量,从而提供关于机械密封物理系统的原始数据。

(2) 分析: 即对信息进行有目的的转化。其基于现有的知识对信息进行分析综合,并产生出新的信息甚至知识。为更好地实现分析功能,可以引入外部的高性能计算资源,以及与公共数据库间共享

数据。

(3) 行动:即基于信息对物理系统施加影响,从而改变密封的工作状态。

归纳起来,这些功能产生以下两方面的效果:一是交互性的提高。这一方面包括向人报告机械密封当前及预期状态,以及执行从人那里接收的指令,从而延伸人对机械密封的掌控能力(若主机具备相应的智能化水平,这种益处同样适用于主机);另一方面也包括与外部的计算资源和数据库间实现网络化;二是自治性的提高,即机械密封通过自我调节实现减少泄漏、延长寿命、保障安全等一般性的目标,以及由人或主机智能系统要求的其他目标,为此可以克服系统内外一定限度内的不利因素的影响。

有必要说明,上述的功能划分主要是为讨论机械密封的智能化划定边界,从而便于有针对性的讨论。实际上,对机械密封智能化程度的评价仍应取决于其在提高交互性和自治性上实际发挥出的效果,而不必拘泥于为能力维度的完备性或技术水平设定静态的“门槛”。

接下来,本文将就机械密封智能化具备的基础、面临的困难、以及可预见的发展途径做一简要介绍。

2 机械密封智能化的实现

2.1 机械密封的自我监测

机械密封的感知能力依赖于监测技术来实现,良好的感知能力需要种类丰富、品质高的监测信号。这里,高的“品质”主要包括高的信噪比、高的动态性和与机械密封工作状态的密切关联性等。

一种保守的方式是,在不依赖于特定机械密封结构的基础上,测量那些可以从外部获得的物理量,本文将之称为非植入式技术,其主要包括对管路中的介质的测量(压强、流量、温度等)和对轴的测量(转速、振动等)。它们容易得到,但品质普遍较差。

为了进一步得到种类更丰富、更高品质的信号,需要改变机械密封的结构,例如将传感器直接安装到机械密封结构内部并传出获得的电信号,或利用新的结构将机械密封内部的某个物理特征“引出”到密封外进行测量。这种植入式监测已经大量地在实验室中被实现,包括测量密封环温度^[29-36]、密封环运动及膜厚^[37-47]、膜压^[48]和摩擦副声发射^[42, 49-55]等。如图3所示是几种典型的植入式监测结构。

目前的工业应用中以非植入式的监测手段,即对管路和轴的测量为主。现有的植入式监测技术手段已比较多样,已经具备获取高品质在线监测信号

的能力,不过若要移植到工业应用中则仍需克服一些困难。在实验室中,通常容易为密封设计一个便于植入传感器的工装。然而,在工业产品中这种设计面对的限制要大得多,包括与主机的兼容性、成本、可靠性、工艺性等。此外,目前从信号中判断机械密封状态的技术并不成熟,在线监测所能产生的价值因此受限。

(a) 热电偶测温^[31]

(b) 电涡流测位移^[37]

(c) 电容测膜厚^[44]

图3 几种监测技术

2.2 机械密封的自我调控

在目前的工程实践中,人们只能对机械密封的管路进行调节,以确保其工作压强、冲洗量^[56]等正常。对于一些特定的机械密封结构,调节管路可以产生明显的影响。例如,对静压机械密封(这里专指向流体膜内引入供压通道的形式^[57])来说,对供压通道进行调控可以起到非常明显的效果^[7],并且具备多自由度调控的潜力^[58]。另一例是隔离补偿环背部空间从而可以单独调节其压力的结构形式^[38-40]。这种依赖于特定结构的调控方法在本文中仍被归为植入式技术。

除调节管路压强外,也可以利用别的物理场来进行调节。*SALANT*等^[30]通过对压电晶体施加电压调节密封端面的锥角来改变压强分布。张国渊等^[59-61]设计了一种磁力加载装置。*ZHOU*等^[62]将磁性液体作为密封介质从而实现调节。

还有一些工作致力于在没有信息系统介入的情况下,使机械密封对一些物理要素的变化做出自适应性的调控。例如利用双层材料或形状记忆材料等来在密封环温度过高时做出反应^[63-64]、在低转速运行时增强静压效应^[65]等。

图4展示了几种典型的调控技术。总的来说,由于机械密封结构紧凑,而调控需要直接或间接地与介质压力对抗,因此目前的调控手段是非常有限的。从目前的技术水平来看,期望对机械密封实现完全的掌控短期内是不现实的,但是仍然可能在机械密封固有的维持稳定的物理机制基础上产生协助作用。

(a) 包含外加压设计的机械密封^[7] (b) 单独调节补偿环背部压力^[38] (c) 用压电晶体改变锥角^[30] (d) 在低转速下增强静压效应^[65]

图4 几种调控技术

2.3 机械密封的自主分析

2.3.1 机械密封自主分析的实现途径

大部分关键问题并不能通过传感器测量来直接得到答案。例如备受关注的端面变形状态就很难由传感器直接测出,对调控行为的决策亦应经过相应的分析判断。因此需要使机械密封的信息系统实现这样的信息转化过程:基于当前的已知条件,以及关于该问题的知识,推测出结论。

机械密封自主分析的实现可分为两种途径。

(1) 将既有知识固化为分析方法。自机械密封出现以来,人们一直在积累关于机械密封的知识——这既包括从实践经验中总结出的规律,也包括对机械密封的材料^[66]、表面形貌^[67]、摩擦学^[68-71]、动力学^[57, 72-76]、热力变形^[77-78]等各方面物理机理和数学模型的研究成果。若将这些知识固化成算法,便实现了使机器利用由人赋予的知识对问题进行推测。其一种具体的实现形式是以知识库-推理机的形式组织起来的专家系统^[79]。

(2) 通过数据驱动解决知识不完备的问题。引入以机器学习技术为代表的驱动思想能在一定程度上降低对完备的既有知识的要求,代之以对样本数据的要求。目前人们对机械密封中许多问题的机理并不具备完全的定量掌握,或者已知的物理量不足以使定量模型封闭,或者完全基于物理知识的模型难以高效求解,此时数据驱动便成为一种非常有益的解决方案:其可以从大量的数据中提炼出(或称为“学习”到)“知识”。需要指出的是,这里所说的“知识”既包括具备可解释性从而可以被人所理解(这意味着这一方法同时可以为机理研究做出贡献)的,也包括不具备可解释性的(此时机器学习模型表现为一种“黑箱”)。在这一方面,学术界已经有一些初步的尝试^[7, 19, 80-83],但暂时还没有形成成熟的技术。

综上所述,为了使机器能作为智能主体对机械密封中的问题进行分析,人可以将既有知识赋予机器,也可以令机器在知识不完备的情况下从数据中提炼“知识”。其中后者固然可以从概念上被视为一种更“高阶”的智能,但若从实用效果出发,两种技术途径在应用场合上的互补特点显而易见:前者足以解决人的知识已经足够完备的问题,后者则对人的知识的不完备之处予以补足。

依目的不同,以下对状态分析和调控决策两类功能分别进行阐述。

图5 自主分析中知识的两种来源: 由人赋予和由机器学习产生

2.3.2 状态分析

本文用“状态分析”指代这样一类功能,即从已知的信息(这些信息往往是直接从传感器得到的“原材料”)来判断机械密封在某个方面的工作状态。需要了解该方面状态的原因可能是人或主机智能系统需要了解——例如,人想要知道密封的剩余寿命,从而合理地后续生产工作做计划,也可能由于需要支持智能系统的其他行为。

机械密封的工作过程涉及多种物理因素的共同参与,并且这些物理因素间存在着繁杂的因果关系(因此,不易做出很严格的分类)。状态分析需要判断各种物理因素当前和预计的状态:

对机械密封的摩擦剧烈程度的估计可以通过测量出口介质或密封环的温度^[29-30, 35]或轴上的扭矩进行,声发射监测^[50, 51]则可以进一步得到摩擦的动态特征。声发射信号的一些特征被认为可以用于识别摩擦模式上的差异,例如区别混合润滑和流体润滑^[52-55]。对备受关注的密封预期寿命的判断通常主要依赖于对磨损进度的识别,目前已经有学者引入机器学习方法^[19, 82-84]进行尝试。

通过与动力学模型进行对照可以判断密封环呈现特定运动行为的原因:非补偿环倾斜、轴系或主机振动、补偿环浮动支承(包括弹簧和副密封)、端面变形等都可能直接反映在密封环的动态行为中^[72-73, 75, 85-86],尽管有时不易区分。也有文献利用温度分布来定性推测变形^[87]。通过测量通过各管路的流量可以推算出密封泄漏量,并且支持对膜厚的判断。

总的来说,现有文献中可被归类为状态分析的内容仍以人工的、定性的、探索性的研究为主,缺乏定量化和规律化的分析方法,从而不能很好地支持机械密封进行自主分析。因此,未来的状态分析需要向定量化和规律化的方向发展,在此基础上使智能型机械密封成为分析主体。

2.3.3 调控决策

调控决策这一类功能起向调控装置发出指令以达到特定性能目标的作用。自20世纪80年代起,

一些团队陆续研究了机械密封中的调控策略,在实验室中完成了对机械密封进行调控以改善其工作状态的实例。

HEILALA 等^[29]、ETSION 等^[34]和 ZOU 等^[38]均采用了类似的方法:在研究特定控制量(端面压力^[29]或背部压力^[34, 38])和特定被测量(温度^[29, 34]或位移^[38])之间的简化模型或规律的基础上选用合适的控制器,从而实现单自由度的反馈控制。SALANT 等^[30, 32-33]一方面从信号中进一步提取特征,另一方面设计了更丰富的决策逻辑。ZHU 等^[7-8]用大量数值模拟结果训练由可监测量映射到调控参数的人工神经网络,从而在实质上引入了数值模型的作用,同时成功规避了数值模拟因占用过多计算资源而不适于实时控制的问题。

这些调控策略均成功地完成了既定目标。不过,已有研究解决的主要还是在实验室中构建出的变量较少的问题,这一特征自然导致它们对多信源的综

合没有很高的要求。但在工业现场并没有这种理想的预设条件,大量不同可能性的存在会对调控决策方法的设计带来全新的挑战。

2.4 智能型机械密封的系统设计

上面对感知、分析和行动三个能力维度的技术基础和面临的困难分别进行了介绍。显而易见的是,这三种能力维度与机械密封结构总共四者之间并非简单的“线性叠加”,从而需要从整个系统的视角去审视。

在为机械密封设计监测/调控结构的过程中,一个明显的制约是监测/调控效能与机械密封物理系统的多方面性能之间的矛盾,表 1 对此进行了小结。面对这些矛盾,在将监测和/或调控结构整合到机械密封中时,在初期可以采用增量式改进的策略,以用短的开发周期和较少的研发资源实现新的功能,并且维持和主机的兼容性。不过,由于不能很好地解决前述矛盾,技术的实施会面临很大的局限。

表 1 监测/调控效能与机械密封物理系统的矛盾

矛盾维度	监测/调控装置需要	机械密封需要	实例
空间尺寸	占用必要的空间	紧凑的结构 安装尺寸与基于传统机械密封设计的主机兼容	需要植入机械密封结构内部时,小、微型传感器优势明显
机械密封工作特性	可能对零件施加力导致变形	端面变形须限制在可接受范围内	监测/调控装置与密封环接触时会发生这种情况,例如声发射传感器和热电偶
	可能需要在零件上制造安装监测/调控装置的配合结构		
	可能与补偿环一同运动	补偿环需要保持良好的浮动性,即低的刚度、阻尼和惯性	当监测/调控装置安装在补偿环上时会增加惯性 基于隔离补偿环背部空间的结构时不可避免
	可能与补偿环间发生挤压或摩擦		
静密封	可能导致泄漏量上升	限制泄漏	一些调控方法伴随着泄漏量的增加,例如采用静压机械密封结构进行调控
	电源线/信号线需要穿越压力边界	在非旋转密封处对高压差实现静密封	当传感器/作动器不位于大气环境时,信号/电源线的出入需要电气贯穿件
其他特性	部分装置需要大电压/电流		采用压电晶体、电磁铁等进行调控时,大电压/电流可能带来电磁安全性与兼容性问题
成本	产生额外的采购和加工成本,部分调控装置额外消耗较大功率	控制成本	

另一个问题则是智能功能面对实际工业现场的大量可能性时的适用性。目前对机械密封智能化的研究多聚焦于单一或少数类型因素变化时的解决方法,这固然是研究初期的必由之路,但未来的智能型机械密封产品一方面应当具备将几乎所有可能的情况纳入考虑的全面性,另一方面至少在处理易发生、高威胁问题时应当具有好的准确性。因此,随着机械密封智能化的技术手段趋于丰富,在设置相关的研发课题时,应逐渐以面向全面性和重点问题准确性进行统筹规划的思路来取代无明确宏观目标的探索性研究。

综上所述,机械密封的智能化在短期内可能以渐进式、增量式为宣,但长远来看,为了使机械密封的智能化可以充分应对复杂的工业环境,需要突

破非智能化条件下的经典结构的限制,以系统视角进行全面的重新设计。

(1) 针对全面性和重点问题准确性的统筹。使感知、分析和行动能力结合后尽可能全面地应对机械密封在生产中可能遇到的情况,防止因遗漏特定可能性而产生严重的误判;在准确性的提升方面,优先解决易发生、高威胁的问题。

(2) 在原理方案选择和空间布置时与监测/调控结构协调。在机械密封的结构中为监测/调控结构让出必要的空间。进一步,有时需要为设计监测/调控结构而对机械密封的原理方案进行重新考虑——例如,在动环补偿式的机械密封中,静环完全静止,此时在静环上设计各种监测/调控结构时相比于静环补偿的情况面对的限制大大减少^[88]。

(3) 从结构设计上增强或拓展智能功能的效能。尽可能将各种传感器安装在它们能获得高品质信号的位置, 甚至通过增添新的要素来创造特征明显而易于识别的信号源(例如使用能产生易分辨特征信号的结构和材料等)^[89]; 改变机械密封的结构从而为调控装置提供更大的作用面积。

(4) 考虑智能化的系统性能评估。一方面, 监测/调控结构的植入会在一定程度上破坏机械密封的固有特性; 另一方面, 机械密封的智能功能会给机械密封带来更优的性能。需要综合这两方面的因素来对智能型机械密封作为一个整体系统的性能进行评估, 在这种整体评估的基础上开展优化设计。

例如, 有些为特定智能功能进行的结构改造削弱了机械密封某些方面的性能, 但这些智能功能所带来的益处可能更大, 因而仍然是值得的。

3 机械密封智能化的发展历程与预期

机械密封的智能化是随着对机械密封性能要求的提高、人对机械密封认识的深入、以及支持性基础技术的进步而逐步发展的。表 2 小结了一些实现特定典型功能的阶段性形式, 包括已有的和预期可以实现的。

表 2 机械密封智能化的不同发展阶段

概括	描述	感知	分析	行动	目前进展
传统机械密封	依赖于人通过目视检查等来获得信息, 然后分析判断并决定采取的措施	—	—	—	固有
外部测控型机械密封	借助非植入式的辅助系统等, 机械密封的管路可以被很好地监测并自动记录, 并且能根据简单的阈值规则进行报警或停机	对轴和管路的非植入式监测	独立处理各信源的简单逻辑	报警和停机	已形成工业产品, 即机械密封辅助系统
可测型机械密封	植入式的监测结构能获得高信噪比、高动态性、与机械密封工作状态关联紧密的信息。这样的高质量信息可以支持人对机械密封工作状态开展细致的分析	非植入式/植入式监测结合	(同上)	(同上)	已在实验室中有很普遍的研究
反馈控制型机械密封	在植入式监测提供高质量信息的基础上, 植入式的调控结构能够对机械密封形成强有力的调控作用。这些改进使得机械密封可以通过反馈控制来试图维持特定被测量的稳定		独立处理各信源的简单逻辑	单自由度植入式调控	实验室中实现了若干反馈控制实例
可知型机械密封	基于植入式的监测取得的高质量的信息, 通过机器学习技术支持下的专家系统可以对描述机械密封当前及未来状态的关键参数形成全面、准确的推测		多信源综合专家系统机器学习	报警和停机	有少量初步研究
自治型机械密封	在准确的状态判断和多自由度调控结构的基础上, 以综合指标的优化替代维持特定物理量稳定的反馈控制, 实现对复杂恶劣工况、误差、耗损和意外事件的广泛、强力适应		多信源综合专家系统机器学习	多自由度植入式调控	
系统化智能型机械密封	面向智能化进行整体设计, 形成深度交互、高度自治的系统	面向智能化的整体设计			

从形式上看, 现阶段已被广泛应用于工业生产的机械密封辅助系统完整地具备了感知、分析和行动等能力维度, 但是这些能力的效果远不能满足生产需要。学术界的探索为这些能力的深入发展提供了知识基础, 包括机械密封机理研究的发展、植入式的监测与调控、以及人工智能思想与技术的引入。目前, 至少在实验室阶段, 已经可以借助丰富的测量手段获得大量高品质原始数据, 并且实现以维持单个或少数标志性物理量稳定为目的的控制。针对交互性和自治性两个目标, 分别可以向使机械密封当前和未来的状态“透明化”的可知型机械密封和适应各种复杂恶劣工况、误差、耗损和意外事件的自治型机械密封两个方向发展。未来成熟的智能型机械密封应当能够成为深度交互、高度自治的系统。

可以预期, 智能化的机械密封在未来将大有可为, 其优势可以列举如下所述。

(1) 获取关于机械密封运行状态的更丰富、更

高品质的数据。大量高品质数据本身是一种有价值的资源: 它们在智能型机械密封系统中自然有着基础性的地位, 而在系统之外也可人为地进行进一步的研究。

(2) 解放人的劳动力, 并且比人更高效、可靠。根据智能化程度不同, 智能型机械密封系统可以自动地完成机械密封维护中的一些工作, 包括数据采集、整理归档、分析判断和故障排除等。

(3) 使人可以准确、及时地获知影响机械密封正常工作的因素、机械密封的寿命预期等, 这将便于人提前制定应对方案, 提高生产效益。若主机也具备相应的智能化水平, 那么这些信息也可以类似地提供给主机的智能系统。

(4) 在存在短期内失效风险时更为准确地报警, 并在必要时采取应急措施, 从而确保生产安全。

(5) 通过自优化来提高性能(主要包括减少泄漏和延长寿命)和适应更宽范围的工况及部件劣化。

(6) 由于智能化已经提供了额外的可靠性, 故可以减少现有结构中的一些冗余成分, 从而减小尺寸和/或降低成本。

综上所述, 机械密封的智能化是下一代机械密封的重要战略发展方向之一, 也是装备智能化的重要组成部分。机械密封密封的智能化目前具备一定的技术基础, 但尚有许多关键技术问题有待解决。尽管如此, 由技术和产业的发展带来的迫切需求, 以及机械学科与人工智能、信息技术、传感技术、材料技术等的多学科交叉与融合, 将成为机械密封的智能化发展的强劲助推力, 机械密封智能化技术的发展和由其带来的装备综合性能的提高值得人们高度重视, 也必将在未来产生巨大价值。

参 考 文 献

- [1] 丁纯, 李君扬. 德国“工业 4.0”: 内容、动因与前景及其启示[J]. 德国研究, 2014, 29(4): 49-66, 126.
DING Chun, LI Junyang. The industry 4.0 future project of Germany: content, motivations, perspectives and its suggestions [J]. Deutschland-Studien, 2014, 29(4): 49-66, 126.
- [2] 国务院. 《中国制造 2025》[EB/OL]. (2015-05-19) http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm. State Council of China. Made in China (2025) [EB/OL]. (2015-05-19) http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [3] 习近平. 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利[N]. 人民日报, 2017-10-28(001).
XI Jinping. Secure a decisive victory in building a moderately prosperous society in all respects and strive for the great success of socialism with Chinese characteristics for a new era [N]. People's Daily, 2017-10-28(001).
- [4] 高金吉, 杨国安. 流程工业装备绿色化、智能化与在役再制造[J]. 中国工程科学, 2015, 17(7): 54-62.
GAO Jinji, YANG Guoan. Greenization, intelligentization and remanufacture in service of equipment in process industry [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(7): 54-62.
- [5] 王维民, 高金吉, 李燕, 等. 离心压缩机轴位移故障自愈调控系统试验研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 49-54.
WANG Weimin, GAO Jinji, LI Yan, et al. Experimental study about centrifugal compressor axial displacement fault self-recovering system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 49-54.
- [6] 高金吉, 陈学东, 秦国良, 等. 高端压缩机组高效可靠及智能化基础研究[J]. 中国科技成果, 2017, 18(16): 12-13.
GAO Jinji, CHEN Xuedong, QIN Guoliang, et al. Basic scientific investigations of high efficiency, reliability and intelligentization for high-end compressor unit [J]. China Science and Technology Achievements, 2017, 18(16): 12-13.
- [7] 朱乔峰. 调控型气体润滑密封扰动性能与智能调控技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
ZHU Qiaofeng. Study on the disturbance performance and the intelligent control technology of the regulatable gas lubricated seal [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [8] LI Shuangxi, ZHU Qiaofeng, CAI Jining, et al. Regulation performance of regulatable dry gas seal [J]. Transactions on Fluid Mechanics, 2016, 11(3): 18-24.
- [9] 高金吉. 人工自愈与机器自愈调控系统[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 83-94.
GAO Jinji. Artificial self-recovery and machinery self-recovery regulation system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 83-94.
- [10] 杨华勇. 工程机械智能化进展与发展趋势[J]. 建设机械技术与管理, 2017, 30(12): 19-21.
YANG Huayong. Progress and trend of construction machinery intelligence [J]. Construction Machinery Technology and Management, 2017, 30(12): 19-21.
- [11] 杨华勇. 工程机械智能化进展与发展趋势(二)[J]. 建设机械技术与管理, 2018, 31(1): 38-39.
YANG Huayong. Progress and trend of construction machinery intelligence (II) [J]. Construction Machinery Technology and Management, 2018, 31(1): 38-39.
- [12] 杨华勇. 工程机械智能化进展与发展趋势(三)[J]. 建设机械技术与管理, 2018, 31(2): 44-46.
YANG Huayong. Progress and trend of construction machinery intelligence (III) [J]. Construction Machinery Technology and Management, 2018, 31(2): 44-46.
- [13] 杨华勇. 工程机械智能化进展与发展趋势(四)[J]. 建设机械技术与管理, 2018, 31(3): 36-37.
YANG Huayong. Progress and trend of construction machinery intelligence (IV) [J]. Construction Machinery Technology and Management, 2018, 31(3): 36-37.
- [14] YANG Junyan, ZHANG Youyun, ZHU Yongsheng, et al. Intelligent fault diagnosis of rolling element bearing based on SVMs and fractal dimension [J]. Mechanical

- Systems and Signal Processing, 2007, 21(5): 2012-2024.
- [15] 贾峰, 武兵, 熊晓燕, 等. 基于 EMD 与多重分形去趋势法的轴承智能诊断方法[J]. 中南大学学报, 2015, 46(2): 491-497.
- JIA Feng, WU Bing, XIONG Xiaoyan, et al. Intelligent diagnosis of bearing based on EMD and multifractal detrended fluctuation analysis [J]. Journal of Central South University, 2015, 46(2): 2012-2024.
- [16] KUMAR A, KUMAR R. Adaptive artificial intelligence for automatic identification of defect in the angular contact bearing [J]. Neural Computing and Applications, 2018, 29(8): 277-287.
- [17] 刘义亚. 基于智能方法及同步压缩技术的滚动轴承故障诊断研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- LIU Yiya. Research on fault diagnosis of rolling bearing based on intelligent method and synchrosqueezing transform [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [18] 张珈豪. 基于超磁致伸缩—磁流体材料的智能轴承研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018.
- ZHANG Jiahao. Research on intelligent bearing based on giant magnetostrictive magnetic fluid [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018.
- [19] 李晓晖. 流体动压型机械密封端面状态监测及健康评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- LI Xiaohui. Hydrodynamic mechanical seal end faces condition monitoring and health assessment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [20] 任宝杰. 机械密封在线监测及智能控制系统研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
- REN Baojie. Study on on-line monitoring and intelligent control systems of mechanical seals [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [21] 顾永泉. 机械密封实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- GU Yongquan. Practical techniques for mechanical face seals [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [22] LEBECK A O. 机械密封原理与设计[M]. 黄伟峰, 李永健, 王玉明等译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- LEBECK A O. Principles and design of mechanical face seals [M]. Translated by HUANG Weifeng, LI Yongjian, WANG Yuming, et al. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [23] NAU B S. Rotary mechanical seals in process duties: an assessment of the state of the art [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1985, 199(A1): 17-31.
- [24] 郝木明. 机械密封技术及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- HAO Muming. Mechanical face seal techniques and applications [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010.
- [25] 吕运容, 陈学东, 高金吉, 等. 我国大型工艺压缩机故障情况调研及失效预防对策[J]. 流体机械, 2013, 41(1): 14-20.
- LÜ Yunrong, CHEN Xuedong, GAO Jinji, et al. Survey of failure of large process compressor in Chinese and failure prevention countermeasure [J]. Fluid Machinery, 2013, 41(1): 14-20.
- [26] 黄亚平, 李小瓯, 陈志杰, 等. 机械密封的可靠性研究[J]. 流体机械, 2000, 28(11): 8-11.
- HUANG Yaping, LI Xiaou, CHEN Zhijie, et al. Research on reliability of mechanical face seals [J]. Fluid Machinery, 2000, 28(11): 8-11.
- [27] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
- Chinese Mechanical Engineering Society. Technology roadmaps of Chinese mechanical engineering [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011.
- [28] FAN Y E, GU Fengshou, BALL A. A review of the condition monitoring of mechanical seals[C]//Proceedings of the ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Manchester, 2004: 197-184.
- [29] HEILALA A J, KANGASNIEMI A. Adjustment and control of a mechanical seal against dry running and severe wear [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Fluid Sealing. 1987: 548-575.
- [30] SALANT R F, MILLER A L, KAY P L, et al. Development of an electronically controlled mechanical seal [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Fluid Sealing. 1987: 576-595.
- [31] PHILIPS R L, JACOBS L E. Experimental determination of the thermal characteristics of a mechanical seal and its operating environment [J]. Tribology Transactions, 1997, 40(4): 559-568.
- [32] SALANT W, NAVON S. Electronically controlled mechanical seal for aerospace applications-part I: design, analysis, and steady state tests [J]. Tribology Transactions, 1994, 37(1): 189-195.
- [33] WOLFF P, SALANT R F. Electronically controlled

- mechanical seal for aerospace applications-Part II: Transient tests [J]. Tribology Transactions, 1995, 38(1): 51-56.
- [34] ETSION I, PALMOR Z, HARARI N. Feasibility study of a controlled mechanical seal [J]. Lubrication Engineering, 1991, 47(8): 621-625.
- [35] TOURNERIE B, REUNGENT D, FRENE J. Temperature measurements by infrared thermography in the interface of a radial face seal [J]. Journal of Tribology, 1991, 113(3): 571-576.
- [36] 白英铎, 熊宇飞. 红外测温在气膜密封试验中的应用 [C]// 第十届航空发动机动力传输学术讨论会会议论文集. 2001: 223-227.
- BAI Yingduo, XIONG Yufei. Application of infrared temperature monitoring in gas seal test [C]// Proceedings of the 10th Symposium of Aero Engine Power Transmission, 2001: 223-227.
- [37] METCALFE R. Dynamic whirl in well-aligned, liquid-lubricated end-face seals with hydrostatic tilt instability [J]. ASLE Transactions, 1982, 25(1): 1-6.
- [38] ZOU Min, GREEN I. Clearance control of a mechanical face seal [J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 535-540.
- [39] ZOU Min, DAYAN J, GREEN I. Feasibility of contact elimination of a mechanical face seal through clearance adjustment [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(3): 478-484.
- [40] DAYAN J, ZOU Min, GREEN I. Contact elimination in mechanical face seals using active control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 344-354.
- [41] 朱亮. 有源气膜密封实时数据采集监测与调控研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- ZHU Liang. The study on real-time data acquisition monitoring and control for gas film seal with outside gas source [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [42] HUANG Zepei, ZHANG Zhi, ZHANG Junkai, et al. Research on the micro scope condition of end face of liquid-lubricated mechanical seals [J]. Advanced Materials Research, 2014, 898: 574-577.
- [43] DIRUSSO E. Film Thickness measurement for spiral groove and Rayleigh step lift pad self-acting face seals [R]. NASA TP-2058, 1982.
- [44] DIRUSSO E. Dynamic behavior of spiral-groove and Rayleigh-step self-acting face seals [R]. NASA TP-2266, 1984.
- [45] DIRUSSO E. Dynamic response of film thickness in spiral groove face seals [R]. NASA TP-2544, 1985.
- [46] ANDERSON W, JARZYNSKI J, SALANT R F. Condition monitoring of mechanical seals: detection of film collapse using reflected ultrasonic waves [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2000, 214(9): 1187-1194.
- [47] 王建磊, 王晓虎, 张琛, 等. 机械密封润滑膜分布的超声检测技术[J]. 中国机械工程, 2019, 30(6): 684-689.
- WANG Jianlei, WANG Xiaohu, ZHANG Chen, et al. Distribution detection method of film thickness in mechanical seal based on ultrasonic principle [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(6): 684-689.
- [48] 宋鹏云, 陈匡民, 董宗玉, 等. “零压差零泄漏”液体润滑螺旋槽机械密封性能的实验研究[J]. 流体机械, 2000, 28(7): 11-13+3.
- SONG Pengyun, CHEN Kuangmin, DONG Zongyu, et al. An experimental investigation of the sealing characteristics of a zero pressure, zero leakage lubricated spiral groove mechanical seal [J]. Fluid Machinery, 2000, 28(7): 11-13+3.
- [49] MIETTINEN J, SIEKKINEN V. Acoustic emission in monitoring sliding contact behavior [J]. Wear, 1995, 181-183(Part 2): 897-900.
- [50] HUANG Weifeng, LIN Youbin, GAO Zhi, et al. An acoustic emission study on the starting and stopping processes of a dry gas seal for pumps [J]. Tribology Letters, 2013, 49(2): 379-384.
- [51] HUANG Weifeng, LIN Youbin, LIU Ying, et al. Face rub-impact monitoring of a dry gas seal using acoustic emission [J]. Tribology Letters, 2013, 52(2): 253-259.
- [52] BRACCESI C, VALIGI M C. Undesired acoustic emissions of mechanical face seals: Model and simulations [J]. Tribology International, 2014, 71: 125-131.
- [53] TOWSYFYAN H, WEI Nasha, GU Fengshou, et al. Identification of lubrication regimes in mechanical seals using acoustic emission for condition monitoring [C]. 54th Annual British Conference of Non-Destructive Testing, 2015.
- [54] TOWSYFYAN H. Investigation of the nonlinear tribological behavior of mechanical seals for online condition monitoring [D]. Huddersfield: University of Huddersfield, 2017.

- [55] TOWSYFYAN H, GU Fengshou, BALL A. Tribological behaviour diagnostic and fault detection of mechanical seals based on acoustic emission measurements [J]. *Friction*, 2019, 7(6): 572-586.
- [56] 衡思宁. 机械密封冲洗回路智能检测与控制系统研制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- HENG Sining. Development of intelligent detection and control system for mechanical seal flushing loop [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [57] 刘雨川. 端面气膜密封特性研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.
- LIU Yuchuan. Behavior of gas film face seal [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [58] 黄伟峰, 刘向锋, 尹源, 等. 一种机械密封智能调节系统与方法: 中国, 201810708566.8 [P]. 2018-09-28.
- HUANG Weifeng, LIU Xiangfeng, YIN Yuan, et al. A system and method for intelligent adjustment of mechanical face seals China: 201810708566.8 [P]. 2018-09-28.
- [59] 张国渊, 赵伟刚, 闫秀天, 等. 可控式液体润滑高速螺旋槽端面密封试验 [J]. *航空动力学报*, 2011, 26(4): 947-953.
- ZHANG Guoyuan, ZHAO Weigang, YAN Xiutian, et al. Experimental study for water-lubricated high-speed controllable spiral-groove face seals [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(4): 947-953.
- [60] ZHANG Guoyuan, ZHAO Weigang. Design and experimental study on the controllable high-speed spiral groove face seals [J]. *Tribology Letters*, 2014, 53(2): 497-509.
- [61] 张国渊, 赵伟刚, 段清娟, 等. 一种基于改变闭合力的可控型机械密封: 中国, 201410349229.6 [P]. 2014-12-03.
- ZHANG Guoyuan, ZHAO Weigang, DUAN Qingjuan, et al. A controllable mechanical face seal based on adjusting closing force: China, 201410349229.6 [P]. 2014-12-03.
- [62] ZHOU Jianfeng, FAN Haoliang, SHAO Chunlei. Experimental study on the hydrodynamic lubrication characteristics of magnetofluid film in a spiral groove mechanical seal [J]. *Tribology International*, 2016, 95: 192-198.
- [63] 张君凯, 王旭, 李志山, 等. 温度触发式非能动停车安全密封装置: 中国, 201410029236.8 [P]. 2014-04-09.
- ZHANG Junkai, WANG Xu, LI Zhishan, et al. Temperature-triggered passive stopping-safe seal: China, 201410029236.8 [P]. 2014-04-09.
- [64] RODRIGUES C. Mechanical seal control mechanism: Great Britain, 20140011427 [P]. 2016-02-10.
- [65] 黄伟峰, 高志, 刘莹, 等. 一种转速自适应智能型流体动压式机械密封装置: 中国, 201410103540.2 [P]. 2014-06-04.
- HUANG Weifeng, GAO Zhi, LIU Ying, et al. Speed-adaptive intelligent hydrodynamic mechanical face seal: China, 201410103540.2 [P]. 2014-06-04.
- [66] 江志斌, 马强. 高速高压机械密封的材料研究 [J]. *现代制造工程*, 2007, 17(11): 62-64.
- JIANG Zhibin, MA Qiang. Study on material of mechanical seal for high-speed and high-pressure [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2007, 17(11): 62-64.
- [67] HU Songtao, BRUNETIERE N, HUANG Weifeng, et al. Continuous separating method for characterizing and reconstructing bi-Gaussian stratified surfaces [J]. *Tribology International*, 2016, 102: 454-462.
- [68] NETZEL J P. Wear of mechanical seals in light hydrocarbon service [J]. *Wear*, 1985, 102: 141-151.
- [69] BONNEAU D, HUITRIC J, TOURNERIE B. Finite element analysis of grooved gas thrust bearings and grooved gas face seals [J]. *Journal of Tribology*, 1993, 115(4): 348-354.
- [70] HU Songtao, HUANG Weifeng, BRUNETIERE N, et al. Stratified effect of continuous bi-Gaussian rough surface on lubrication and contact [J]. *Tribology International*, 2016, 104: 328-341.
- [71] HU Songtao, HUANG Weifeng, LIU Xiangfeng, et al. Influence analysis of secondary O-ring seals in dynamic behavior of spiral groove gas face seals [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(3): 507-514.
- [72] SEDY J. A new self-aligning mechanism for the spiral gas seal stability [J]. *STLE Lubrication Engineering*, 1980, 36(10): 592-598.
- [73] MILLER B A, GREEN I. numerical formulation for the dynamic analysis of spiral-grooved gas face seal [J]. *Journal of Tribology*, 2001, 123(2): 395-403.
- [74] DING Xuexing, ZHANG Haizhou, ZHANG Weizheng, et al. Axial vibration test and analysis on gas film sealing ring system in dry gas seal [J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2013, 33(2): 231-235, 337-338.
- [75] HU Songtao, HUANG Weifeng, LIU Xiangfeng, et al.

- Influence analysis of secondary O-ring seals in dynamic behavior of spiral groove gas face seals [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(3): 507-514.
- [76] 孙电锋, 孙见君, 於秋萍, 等. 非接触式机械密封动力学研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(12): 5238-5246.
- SUN Dianfeng, SUN Jianjun, YU Qiuping, et al. Progress of study on dynamics of non-contacting mechanical seals [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(12): 5238-5246.
- [77] BRUNETIERE N, TOURNERIE B, FRENE J. TEHD lubrication of mechanical face seals in permanent regime. Part 1: Numerical model and experiments [J]. Journal of Tribology, 2003, 125: 608-616.
- [78] BRUNETIERE N, TOURNERIE B, FRENE J. TEHD lubrication of mechanical face seals in stable tracking mode: Part2—parametric studies [J]. Journal of Tribology, 2003, 125: 617-627.
- [79] 蔡自兴, DURKIN J, 龚涛. 高级专家系统: 原理、设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- CAI Zixing, DURKIN J, GONG Tao. Advanced expert systems: Principles, design and applications [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [80] ZHANG Zhi, LI Xiaohui. Acoustic emission monitoring for film thickness of mechanical seals based on feature dimension reduction and cascaded decision [C]// Proceedings 2014 6th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2014: 64-70.
- [81] ZHANG Erqing, FU Pan, GE Zhendi, et al. Study on AE in mechanical seal lift-off recognition of mechanical main shaft [J]. Sensors and Transducers, 2014, 173(6): 158-165.
- [82] 张尔卿. 机械密封端面状态监测及寿命预测关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- ZHANG Erqing. Research of key technologies on mechanical seal end face condition monitoring and life prediction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [83] 李克斯, 张尔卿, 傅攀, 等. 不完备先验知识下的机械密封端面磨损状态评估研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(6): 717-725.
- LI Kesi, ZHANG Erqing, FU Pan, et al. Condition assessment on mechanical seal face wear based on incomplete prior knowledge [J]. Tribology, 2016, 36(6): 717-725.
- [84] 张思聪. 基于随机过程的机械密封剩余使用寿命预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHANG Sicong. Prediction of the remaining service life of mechanical seal based on stochastic process [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [85] YIN Yuan, HUANG Weifeng, LIU Xiangfeng, et al. Analysis of the dynamic friction of a gas face seal based on acoustic emissions [J]. Tribology Letters, 2018, 66(3): 85.
- [86] YIN Yuan, LIU Xiangfeng, HUANG Weifeng, et al. Gas face seal status estimation based on acoustic emission monitoring and support vector machine regression [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(5): 1-14.
- [87] 陆俊杰, 丁雪兴, 张伟政, 等. 高速高压螺旋槽干气密封端面温度的测试分析[J]. 化工学报, 2015, 66(6): 2174-2180.
- LU Junjie, DING Xuexing, ZHANG Weizheng, et al. Test and analysis of face temperature for spiral groove dry gas seal under high-pressure and high-rotate-speed [J]. CIESC Journal, 2015, 66(6): 2174-2180.
- [88] 黄伟峰, 刘向锋, 尹源, 等. 智能型机械密封系统及其实现方法: 中国, 201910471618.9 [P]. 2019-08-23.
- HUANG Weifeng, LIU Xiangfeng, YIN Yuan, et al. Intelligent mechanical face seal system and its implement: China, 201910471618.9 [P]. 2019-08-23.
- [89] 黄伟峰, 刘向锋, 尹源, 等. 可监测型机械密封装置: 中国, 201821328211.8 [P]. 2019-04-05.
- HUANG Weifeng, LIU Xiangfeng, YIN Yuan, et al. Perceptive mechanical face seal: China, 201821328211.8 [P]. 2019-04-05.

作者简介: 尹源, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械密封。

E-mail: thuyinyuan@126.com

黄伟峰(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为机械密封。

E-mail: huangwf@tsinghua.edu.cn