◆产业赋能与业态融合◆

磷化工设备专用智能诊断服务平台“工业小郎中”应用实践

谷海明[1]，朱道俊[1]，张　鹤[1]，吕志远[2]，殷　伟[2]，宋国华[2]

（1. 云南磷化集团海口磷业有限公司，云南 昆明　650100；
2. 观为监测技术无锡股份有限公司，江苏 无锡　214000）

［摘　要］磷化工设备因其恶劣工况对传统定期检修模式构成严峻挑战，探索智能化、预测性的设备健康管理方案具有紧迫的工程意义。针对磷化工设备故障诊断需求，提出基于“工业小郎中”无线智能诊断服务平台的解决方案。通过在云南磷化集团海口磷业有限公司7个装置站点部署1 000余支无线振温传感器，结合MechAI智能诊断模型（融合故障机理与机器学习技术），实现对400余台关键设备的7×24 h状态监测。应用半年内成功预警21起设备故障（滚动轴承损伤、联轴器磨损等），并通过循环水泵轴承损伤的完整监测案例，验证了系统在早期预警、运行监护及检修闭环中的有效性。该平台为磷化工设备预测性维护提供了可靠支撑，推动设备管理向智能化转型升级。

［关键词］磷化工设备；振温监测；智能诊断；预测性维护；无线传感；MechAI；工业应用案例
［中图分类号］TH165+.3　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097-4566（2025）12-0114-05

Application of “Industrial Little Doctor” intelligent diagnosis platform for phosphorus chemical equipment

GU Haiming[1], ZHU Daojun[1], ZHANG He[1], LYU Zhiyuan[2], YIN Wei[2], SONG Guohua[2]

（1. *Yunnan Phosphate Group Haikou Phosphorus Industry Co., Ltd., Kunming* 650100, *China*;
2. *Guanwei Monitoring Technology Wuxi Co., Ltd., Wuxi* 214000, *China*）

Abstract: Phosphorus chemical equipment poses severe challenges to traditional periodic maintenance models due to its harsh operating conditions, making the exploration of intelligent and predictive equipment health management solutions imperative in engineering. To address the fault diagnosis needs of phosphorus chemical equipment, a solution based on the “Industrial Little Doctor” wireless intelligent diagnosis service platform is proposed. By deploying over 1 000 wireless vibration and temperature sensors across seven production units of Yunnan Phosphate Group Haikou Phosphorus Industry Co., Ltd., and integrating the MechAI intelligent diagnosis model (combining fault mechanisms with machine learning technology), the system achieves 7×24 hours condition monitoring for over 400 key pieces of equipment. Within six months of application, 21 equipment failures (such as bearing damage and coupling wear) are successfully predicted. The complete monitoring case of bearing damage in a circulating water pump further validates the system’s effectiveness in early warning, operational supervision and maintenance closure. This platform provides reliable support for predictive maintenance of phosphorus chemical equipment, driving the intelligent transformation and upgrading of equipment management.

Key words: phosphorus chemical equipment; vibration temperature monitoring; intelligent diagnosis; predictive maintenance; wireless sensing; MechAI; industrial application cases

旋转设备振动监测与故障诊断技术成熟有效，是提升设备预测性维护与管理水平的重要手段[1]。通过在线监测设备状态数据，可辅助磷化工设备管理者及时发现潜在设备故障，提前制定维护计划，合理安排停机检修，减少停机时间和生产损失，提高生产效率和运营效益[2]。然而，磷化工生产过程具有强腐蚀、易结垢、介质复杂的特性，传统定期检修模式面临巨大挑战：一方面，过度检修导致非计划停机频次高、维护成本激增；另一方面，故障

［收稿日期］2025-07-24；　［修回日期］2025-09-18
［作者简介］谷海明（1986-），男，湖南张家界人，高级工程师，从事磷氟工程设备设计与管理工作。

隐患无法在停机间隔期内被及时发现，易引发泄漏、停机甚至安全事故。随着物联网、大数据及人工智能技术成熟，基于无线传感的智能化在线监测为解决上述痛点提供了新路径[3]。通过 7×24 h 实时感知设备状态，构建故障早期预警与预测性维护能力。磷化工设备维修正从传统的被动响应的定期检修，向自动化、智能化的预测性维护模式深刻转变。这一转型不仅是技术发展的必然趋势，更是企业提升设备可靠性、降本增效的内在需求[4]。

与传统振动监测系统相比，本研究提出的“工业小郎中”平台在 3 个方面推进创新：（1）在部署灵活性上，传统系统依赖有线传感与固定采集站，在磷化工复杂环境下布线困难、扩展性差；本平台采用无线振温传感器与 Mesh 自组网，安装便捷，克服了环境限制，有效提升了系统的可扩展性与适应性。（2）在诊断智能性上，传统方法多限于阈值报警与人工分析，响应滞后且依赖专家经验；本平台核心的 MechAI 模型融合故障机理与机器学习，实现了从“监测报警”到“智能诊断”的跨越，具备早期故障识别与多故障并发诊断能力。（3）在管理流程化上，传统系统往往“重监测、轻管理”，诊断与运维脱节；本平台通过自动触发“设备缺陷单”并推送至责任人，实现了“监测–诊断–预警–检修–反馈”的全流程闭环管理，推动设备维护从被动响应向主动预测与流程协同的根本性转变。

1　工程介绍

为推进云南磷化集团海口磷业有限公司（简称海口磷业）精细磷化工设备预测性维护管理自动化、智能化升级，自 2024 年 6 月起，在海口磷业磷酸厂、硫酸厂等 7 个装置站点分两个阶段在 400 余台关键设备上部署 1 000 余支无线振温传感器，利用“工业小郎中”无线智能诊断服务平台，获取 7×24 h 设备看护服务[5]。

“工业小郎中”无线智能诊断服务平台依托云服务器提供智能诊断和数据访问服务。“工业小郎中”平台主要包括 3 部分：设备端、平台端和用户端。

1.1　设备端

采用无线三轴向传感采集方式（水平、垂直、轴向），通过磁吸或螺纹连接安装在设备轴承座表面，摆脱线缆束缚，降低施工难度，同时便于系统维护与扩展[6]。双吸泵组 4 个传感器安装布置如图 1 所示。

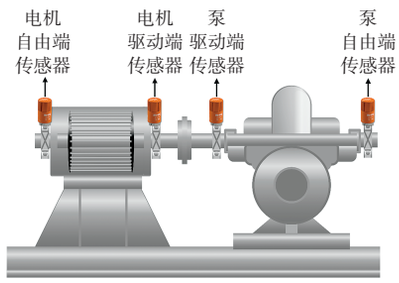

图 1　双吸泵组传感器测点布置

Fig. 1　Sensor layout for double-suction pump

1.2　平台端

平台端核心驱动为 MechAI 智能模型，MechAI 是基于故障机理模型（Mechanism）和人工智能机器学习（AI）技术融合[7]的智能诊断算法。MechAI 及时响应无线传感器上传的每条实时振动数据，持续提供数据分析、诊断结论与维护建议，逻辑框架如图 2 所示。

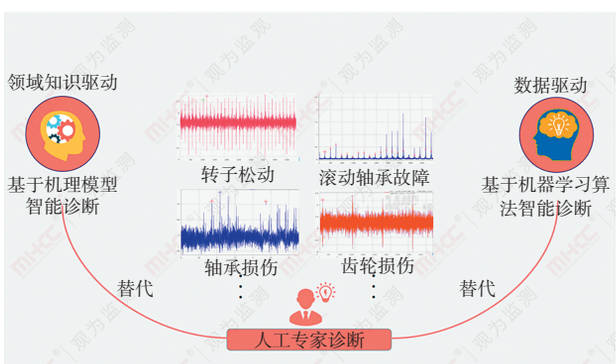

图 2　MechAI 智能诊断逻辑框架

Fig. 2　Logical framework of MechAI intelligent diagnosis

MechAI 智能诊断模型可辅助现场设备管理者快速锁定常见振动问题：（1）滚动轴承损伤；（2）联轴器磨损；（3）旋转碰磨；（4）不平衡；（5）不对中；（6）旋转松动或流体不稳等。

1.3　用户端

通过移动端 APP 和 PC（电脑）端网页两种方式访问该设备智能监测系统，多视角观察设备运行状态：振值与温度趋势、异常报警记录、诊断结论详情和设备健康统计、振动波形与频谱等。

重要紧急设备故障与传感器异常则以邮件日报发送至相关人员。

1.4　工作原理

“工业小郎中”无线智能诊断服务平台工作原理遵循“数据感知与传输→边缘计算→云端智能→应用服务”的闭环逻辑，其完整工作流程如图 3 所示。

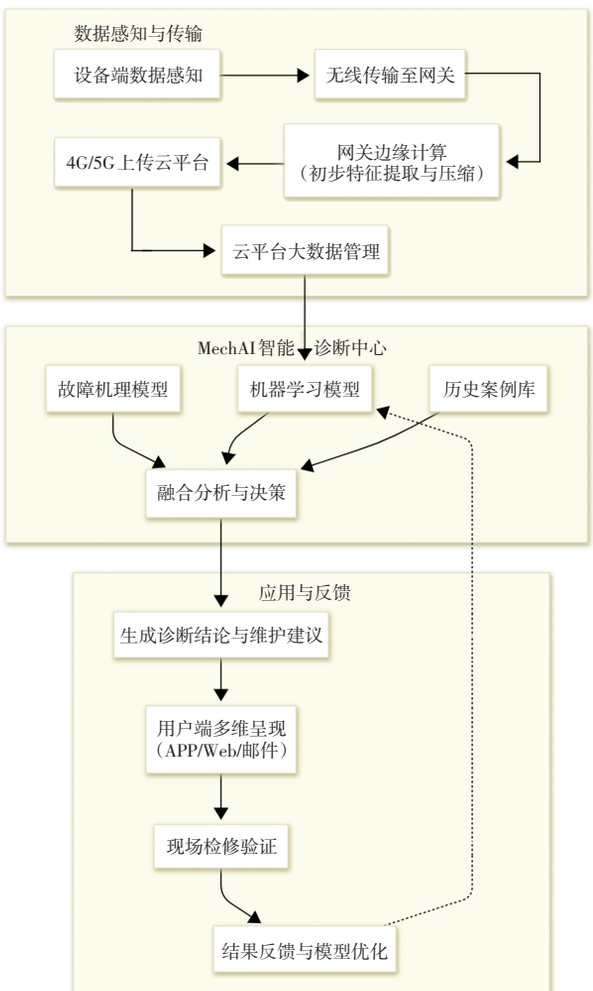

图3　“工业小郎中”无线智能诊断服务平台工作流程

Fig. 3　Workflow of “Industrial Little Doctor” intelligent diagnosis platform

数据感知与传输：部署在设备轴承座的无线振温传感器，以可配置的采样策略（如定时/触发式）同步采集三轴向振动加速度及温度信号。采集到的原始数据经内置预处理后，通过无线Mesh自组网技术传输至区域网关，有效克服了磷化工厂区复杂环境下的布线难题。

智能诊断与决策生成：云端部署的MechAI智能诊断引擎对上传数据进行两级分析，首先基于转子动力学、轴承故障特征频率等先验物理知识，进行故障模式的初筛与识别[8]，确保诊断结果的可解释性。然后调用经历史案例训练的机器学习模型对振动频谱、波形特征进行深度挖掘，识别易被噪声信号湮没的早期轴承损伤、异常周期冲击等潜在故障[9]。两级模型通过贝叶斯推断框架进行融合决策[10]，最终输出较高置信度的诊断结论与维护建议。

结果呈现与闭环管理：诊断结果实时推送至用户端（APP/Web）。系统不仅提供当前状态评估，还自动生成并流转“设备缺陷单”至相关责任人，触发巡检、润滑、计划检修等运维流程。检修结果最终被反馈至系统，用于优化MechAI模型，形成持续改进的诊断–维护–优化闭环[11]。

2　应用效果

2.1　故障记录

2024年12月1日至2025年5月31日，“工业小郎中”无线智能诊断服务平台投入运行半年期间，该设备智能监测系统共发现、预警较严重的设备故障21项，其中10项如表1所示。所有21项智能预警故障记录，经设备检修专家现场拆解，确认诊断

表1　2024年12月至2025年5月设备故障记录（节选10条）

Table 1　Equipment fault records from December 2024 to May 2025（10 cases excerpted）

序号	装置区	设备编号	MechAI智能诊断	现场验证	检修措施	检修时间
1	装置2	循环水泵P–404A2	泵非驱动端 轴承6315损伤	轴承故障	更换轴承	2025–03–26
2		循环酸泵MP–2113	泵转子转频一倍频 异常振动冲击	泵转子旋转碰磨	更换循环泵	2025–04–07
3	装置3	尾气风机C–46102	风机转子旋转松动、 温度>90 ℃	风机叶轮侧轴承 “跑套”磨损发热	更换叶轮轴、轴承	2025–01–09
4		过滤真空泵P–215B	泵转子转频一倍频 异常振动冲击	联轴器磨损	更换齿箱、联轴器	2025–03–20
5		尾气风机C–46101	风机转子旋转松动 或流体不稳	叶轮结垢、叶轮侧轴承 外圈“跑套”	清理叶轮、更换轴承	2025–05–17
6	装置5	风机K–3005	风机不平衡、 温度>70 ℃	叶轮结垢	清理叶轮	2025–02–02
7		干燥风机K–7102	风机叶轮侧 轴承22328损伤	轴承故障	更换轴承	2025–05–30
8	装置6	白酸泵P–0203B	泵不对中	联轴器磨损	更换联轴器橡圈	2024–12–19
9		斗提机L–0201	电机不平衡	基础支承刚性不足	增强系统支承刚性	2024–12–25
10	装置7	排渣泵P–5102A	泵驱动端轴承22230损伤	轴承故障	更换轴承	2024–12–20

结论与实际故障特征全部吻合。该智能系统具有较好的预测性检修指导作用，为企业安全生产作出了贡献。

相关故障设备经检修或更换备件后已恢复正常，21 项故障记录与实际检修记录均已建档存入案例库，为同类型、同批次设备提供一手的诊断、检修知识经验，也为 MechAI 智能模型积累更多有标签数据[12]。

2.2　故障类型

统计分析现存 21 项故障记录可知，2024 年 12 月 1 日至 2025 年 5 月 31 日期间，发生故障设备数量约占总监测设备数量的 5%，与往年同期基本持平。

已验证设备故障类型分布情况如表 2 所示，其中滚动轴承故障、联轴器磨损及叶轮结垢不平衡 3 项合计占 85.7%，滚动轴承故障发生概率最高，达 52.4%，凸显介质结晶行业特殊性。

表 2　2024 年 12 月至 2025 年 5 月设备故障类型统计

Table 2　Statistical analysis of fault types from December 2024 to May 2025

序号	设备故障类型	数量	占比/%
1	滚动轴承故障	11	52.4
2	联轴器磨损	4	19.0
3	叶轮结垢不平衡	3	14.3
4	转子旋转碰磨	1	4.8
5	基础刚性不足	1	4.8
6	旋转松动或气蚀	1	4.8

通过实际故障类型的逐年统计分析，可辅助设备管理者有效评估常见设备故障发生概率，掌握各种典型故障从产生、劣化至不可接受的生命周期，为决策设备故障最佳检修时机提供理论依据。

3　典型案例

3.1　故障预警

2025 年 1 月 3 日，MechAI 智能预警：装置 2 循环水泵 P-404A2 非驱动端轴承（型号 SKF_6315）内圈早中期损伤，建议加强润滑，跟踪振动发展趋势。

2025 年 1 月 10 日，该轴承状态进一步发展为：轴承内圈中期损伤，建议关注劣化趋势，择机检查轴承损伤情况，视情维护。图 4 为基于工业互联网平台移动端智能诊断详情，实时交互性较好。

同时，系统自动触发一条“设备缺陷单”处理流程，设备报警信息随即推送至装置 2 负责人。

收到“设备缺陷单”任务后，设备维护专工到达现场，结合经验听诊与手持振动仪对比检测，判断该轴承存在明显异常。

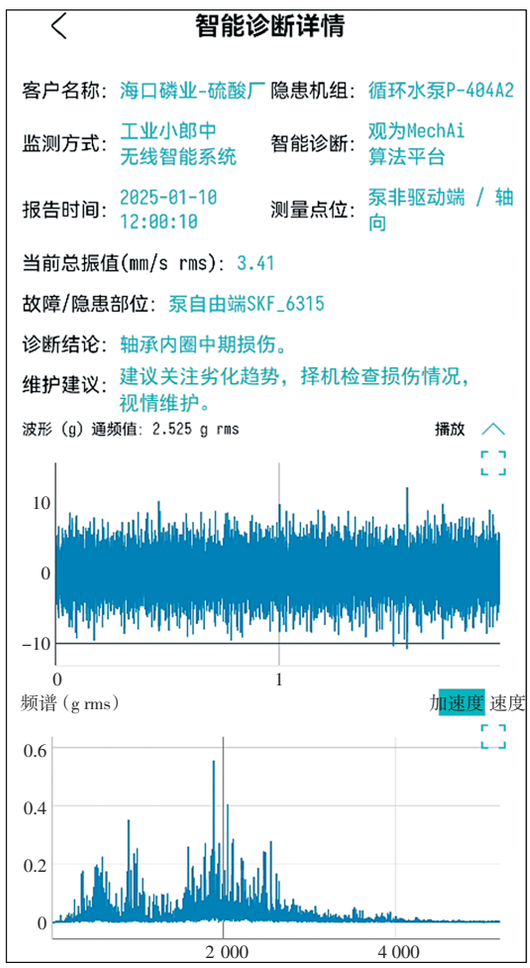

图 4　移动端 APP 智能诊断详情

Fig. 4　Intelligent diagnosis details on mobile APP

3.2　监护运行

由于该循环水泵工艺关键且暂时无法停机处理，经设备管理部综合研讨后，计划继续运行至 6 月大修集中处理，设备专工负责每日巡检跟踪故障发展趋势。

期间重点加强两项设备维护保障：

（1）在保证润滑脂不超水泵厂家规定加脂总量（基于单次加脂量、加脂间隔）的前提下，以“少量多次”方式充分润滑损伤轴承，并结合排出油脂金属颗粒物含量观察轴承磨损状态变化趋势；

（2）严防水泵非驱动端轴承座水分与污染物侵入可能，每日检查潜在可能介质泄漏点，定时清洁轴承座及相邻设备表面。

依靠该设备智能监测系统的振温监测+智能诊断的 7×24 h“哨兵”功能，P-404A2 水泵非驱动端轴承在人机配合密切监视下，各项状态指标基本维稳，未见明显增长。

3.3 检修处理

2025年3月26日，装置2循环水泵P-404A2获得临停许可，紧急切换备用泵后恢复生产运行。

经拆解检查，确认该泵非驱动端轴承SKF_6315内圈存在明显损伤，最终完成水泵两套机封与两盘轴承更换。

2025年3月31日，基于MechAI证实该泵恢复正常后，相关轴承损伤照片与检修记录被上传至原“设备缺陷单”，设备管理部审核同意完结流程，形成管理闭环。

4 总结与展望

将“工业小郎中”无线智能诊断服务平台应用于海口磷业的设备管理实践，为解决磷化工行业面临的设备维护管理难题提供了行之有效的智能化方案，是传统磷化工企业设备管理数字化转型的一次成功探索。

该平台依托无线传感与物联网技术，工程实施便捷高效，有效克服了磷化工装置环境复杂、布线困难的问题，为在传统流程行业大规模部署设备状态监测系统提供了可复用的经验。

平台核心MechAI智能诊断模型在半年内成功诊断21起设备故障。系统不仅能实现轴承损伤等故障的早期预警，还能为基于状态的预测性维护决策（如监护运行、择机检修）提供可靠依据，有效避免了非计划停机。

结合系统智能诊断功能与已积累的历史故障生命周期规律，制定精细化的部件采购与设备检修计划，不仅可实现预测性维护，进一步降低年度设备故障发生率，更能为备件联储联备、检修资源优化配置提供决策支持，实现降本增效。

[参考文献]

[1] 祝旭.故障诊断及预测性维护在智能制造中的应用[J].自动化仪表,2019,40(7):66-69.
ZHU X. Application of Fault Diagnosis and Predictive Maintenance in Intelligent Manufacturing[J]. Process Automation Instrumentation,2019,40(7):66-69.

[2] 刘帅杰,李扬.磷化工企业数字化转型路径探讨[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(1):115-119.
LIU S J, LI Y. Discussion on digital transformation path of phosphorus chemical enterprises[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering,2025,40(1):115-119.

[3] 李文韬,钱科,张涛.矿用振动传感器的研究现状与发展趋势[J].煤矿机械,2025,46(4):96-99.
LI W T, QIAN K, ZHANG T. Research Status and Development Trend of Mining Vibration Sensor[J]. Coal Mine Machinery,2025,46(4):96-99.

[4] 沈海龙,周江润,李雪.对磷化工领域低碳节能现状的探究[J].云南化工,2024,51(S1):43-45.
SHEN H L, ZHOU J R, LI X. Exploration of Low Carbon and Energy Saving in Phosphorus Chemical Industry[J]. Yunnan Chemical Technology,2024,51(S1):43-45.

[5] 房何,杨强,管玉峰,等.田湾核电站基于边缘计算与大数据的设备状态监测与智能诊断平台的应用[J].电力大数据,2022,25(9):61-67.
FANG H, YANG Q, GUAN Y F, et al. Application of Equipment Condition Monitoring and Intelligent Diagnosis Platform Based on Edge Computing and Big Data in TNPS[J]. Power Systems and Big Data,2022,25(9):61-67.

[6] 骆寅,董健,韩岳江.基于无线传感网络的水泵振动状态监测系统设计[J].现代电子技术,2020,43(12):30-34.
LUO Y, DONG J, HAN Y J. Design of pump vibration state monitoring system based on wireless sensor network[J]. Modern Electronics Technique,2020,43(12):30-34.

[7] 金立杰,许旭,吴盛威,等.深度学习驱动的设备预测性维护现状与展望[J].制造业自动化,2025,47(2):123-131.
JIN L J, XU X, WU S W, et al. Device Predictive Maintenance Driven by Deep Learning: Overview and Perspectives[J]. Manufacturing Automation,2025,47(2):123-131.

[8] 黄斯琪,谭志银,杨思国,等.改进的傅里叶分解方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2023,42(12):178-186.
HUANG S Q, TAN Z Y, YANG S G, et al. An improved Fourier decomposition method and its application in fault diagnosis of rolling bearings[J]. Journal of Vibration and Shock,2023,42(12):178-186.

[9] 王岩红,温笑欢,揭永琴,等.基于对比学习的滚动轴承早期故障在线检测方法[J].振动与冲击,2023,42(14):229-236.
WANG Y H, WEN X H, JIE Y Q, et al. Online detection method for bearing incipient faults based on contrastive learning[J]. Journal of Vibration and Shock,2023,42(14):229-236.

[10] 朱建新,陈学东,吕宝林,等.基于多维高斯贝叶斯的机械设备失效/故障智能诊断及参数影响分析[J].机械工程学报,2020,56(4):35-41.
ZHU J X, CHEN X D, LV B L, et al. Smart Failure/Fault Diagnosis and Influence Analysis for Mechanical Equipment with Multivariate Gaussian Bayesian Method[J]. Journal of Mechanical Engineering,2020,56(4):35-41.

[11] 蔡彤.基于全生命周期设备管理的预测性维护技术研究[J].智能制造,2025(3):28-33.
CAI T. Research on Predictive Maintenance Technology Based on Full Lifecycle Equipment Management[J]. Intelligent Manufacturing,2025(3):28-33.

[12] 栗云昊,郭茂祖,段然,等.基于多实例学习算法的机械系统模式识别模型[J].振动与冲击,2025,44(16):126-136.
LI Y H, GUO M Z, DUAN R, et al. Multi instance learning algorithm based on weakly supervised framework pattern recognition model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(16):126-136.