

分类号: TP2;TP3
学号: 20232109044

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于双信号融合的辣椒收获机 弹齿滚筒负荷监测研究

学位申请人	王志
指导教师	秦新燕 副教授 陈绍杰 工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究方向	机械工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2026年05月

分类号: TP2;TP3
学号: 20232109044

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于双信号融合的辣椒收获机 弹齿滚筒负荷监测研究

学位申请人	王志
指导教师	秦新燕 副教授 陈绍杰 工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究方向	机械工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2026年05月

Research on Load Monitoring of the Tine Rotor of a Pepper Harvester
Based on Dual Signal Fusion

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Zhi Wang

(Mechanical Engineering)

Dissertation Supervisor: Assoc.Prof. Xinyan Qin; Engineer. Shaojie Chen

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明


本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 


时间：2026年5月14日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 

时间：2026年5月14日

导师签名： 

时间：2026年5月14日

摘要

新疆作为我国辣椒主产区之一，虽已基本实现机械化采收，但智能化作为新的发展趋势，辣椒采收设备的智能化程度有待提高，其中弹齿滚筒负荷的精准识别是实现智能化采收的关键瓶颈。弹齿滚筒负荷波动会直接导致辣椒采净率降低、破损率升高，甚至引发弹齿变形等设备故障，因此实现其负荷的精准监测对提升辣椒采收质量与效率、降低生产成本具有重要工程意义。本文以辣椒收获机试验台弹齿滚筒为研究对象，融合振动与扭矩双信号，结合试验探究、模型建立等方法，开展弹齿滚筒负荷监测研究。

第一步，设计并开展辣椒收获机弹齿滚筒采收试验，搭建振动与扭矩信号检测系统，以滚筒转速、前进速度为输入参数，通过单因素变量法确定参数适宜范围，再采用 CCD 中心试验完成多因素交互作用分析，精准得到最优作业参数为前进速度 0.42 m/s、滚筒转速 150 r/min。基于最优参数探究喂入量与采收指标的关联规律，根据不同喂入量进行负荷划分，明确正常负荷状态下可获得最优采收指标，为负荷识别奠定试验基础与分类依据。

第二步，针对四种负荷状态对应的振动、扭矩信号进行滤波预处理，基于双信号的耦合与混沌特性，引入 Lorenz 系统与 Rossler 系统，通过交叉反馈耦合项构建六维 Lorenz-Rossler 耦合动力学模型。设计遗传算法全局搜索加高斯-牛顿法局部优化的两步法估计模型参数，实现对弹齿滚筒采收系统动态特性的精准刻画，反演验证表明模型可有效复现双信号的动态变化规律。

第三步，挖掘耦合动力学模型的混沌特征，将李雅普诺夫指数作为表征负荷变化的核心特征量，对实测不同负荷的试验数据等时间间隔离散化并完成相空间重构，采用 Jacobian 法计算李雅普诺夫指数，分析发现不同负荷下该指数呈现边界清晰的区间分布特征，可有效区分各类负荷状态。基于此提出基于振动和扭矩双信号融合的负荷识别方法，构建“一对多”多分类 SVM 分类器，经实例验证与算法对比，该方法在小样本条件下所需数据量更少、识别准确度更高。

最后，完成负荷识别模型的工程化验证，基于树莓派 4B 搭建轻量化软硬件监测系统，开发集信号实时采集、特征计算、负荷识别、数据存储于一体的可视化软件平台，在辣椒收获机试验台上开展台架验证试验，并明确该监测研究的应用。结果表明，所提方法的弹齿滚筒负荷识别整体准确率达 92%。

综上所述，本文构建的基于双信号融合的辣椒收获机弹齿滚筒负荷识别方法，突破了传统单信号监测、特征级拼接的局限，实现了弹齿滚筒负荷的监测识别与应用，具有一定的实用性，同时也为农业机械旋转部件的状态监测提供了新的思路。

关键词：弹齿滚筒；遗传算法；负荷识别；混沌特征；双信号融合

Abstract

As one of the main pepper-producing regions in China, Xinjiang has basically achieved mechanized harvesting. However, with intelligence as a new development trend, the intelligence level of pepper harvesting equipment needs to be improved. Among them, the accurate identification of the load on the spring-tooth drum is a key bottleneck for intelligent harvesting. Load fluctuations of the spring-tooth drum will directly lead to a decrease in pepper harvesting cleanliness, an increase in damage rate, and even equipment failures such as spring-tooth deformation. Therefore, achieving accurate load monitoring is of great engineering significance for improving pepper harvesting quality and efficiency, as well as reducing production costs. Taking the spring-tooth drum of a pepper harvester test bench as the research object, this thesis carries out a load monitoring study on the spring-tooth drum by integrating vibration and torque dual signals, combined with experimental exploration and model establishment.

Firstly, pepper harvesting experiments using the spring-tooth drum of the pepper harvester were designed and conducted, and a vibration and torque signal detection system was built. With drum speed and forward speed as input parameters, the suitable parameter ranges were determined through the single-factor variable method. Then, a CCD central experiment was adopted to analyze the multi-factor interaction, and the optimal operating parameters were accurately obtained: a forward speed of 0.42 m/s and a drum speed of 150 r/min. Based on the optimal parameters, the correlation between feeding rate and harvesting indicators was explored. The load was classified according to different feeding rates, and it was clarified that the optimal harvesting indicators could be achieved under normal load conditions, laying an experimental foundation and classification basis for load identification.

Secondly, filtering preprocessing was performed on the vibration and torque signals corresponding to four load states. Based on the coupling and chaotic characteristics of the dual signals, the Lorenz system and the Rossler system were introduced, and a six-dimensional Lorenz-Rossler coupled dynamic model was constructed through cross-feedback coupling terms. A two-step method combining global search by genetic algorithm and local optimization by Gauss-Newton method was designed to estimate model parameters, realizing an accurate characterization of the dynamic characteristics of the spring-tooth drum harvesting system. Inversion verification showed that the model can effectively reproduce the dynamic variation laws of the dual signals.

Thirdly, the chaotic characteristics of the coupled dynamic model were mined, and the Lyapunov exponent was taken as the core characteristic quantity representing load changes. The experimental data of

different measured loads were discretized at equal time intervals and phase space reconstruction was completed. The Lyapunov exponent was calculated using the Jacobian method. Analysis revealed that the exponent presents a clearly bounded interval distribution under different loads, which can effectively distinguish various load states. Based on this, a load identification method based on the fusion of vibration and torque dual signals was proposed, and a "one-vs-rest" multi-class SVM classifier was constructed. Case verification and algorithm comparison showed that this method requires less data volume and achieves higher recognition accuracy under small-sample conditions.

Finally, engineering verification of the load identification model was completed. A lightweight software and hardware monitoring system was built based on Raspberry Pi 4B, and a visual software platform integrating real-time signal acquisition, feature calculation, load identification and data storage was developed. A bench verification experiment was carried out on the pepper harvester test bench, and the application of this monitoring research was clarified. The results show that the overall accuracy of the proposed method for spring-tooth drum load identification reaches 92%.

In summary, the load identification method for the spring-tooth drum of pepper harvesters based on dual-signal fusion constructed in this thesis breaks through the limitations of traditional single-signal monitoring and feature-level splicing, realizes the monitoring, identification and application of spring-tooth drum load, and has certain practicability. It also provides a new idea for condition monitoring of rotating components in agricultural machinery.

Key words: Tine roller; Genetic Algorithm; Load identification; Chaotic characteristics; Dual signal fusion

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
主要符号表.....	VII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 辣椒种植发展现状.....	1
1.1.2 弹齿滚筒负荷监测的工程需求与研究价值.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 旋转机械部件状态监测方法的研究现状.....	2
1.2.2 多信号融合技术在状态监测中的研究现状.....	4
1.2.3 农业机械状态监测识别研究现状.....	5
1.3 研究现状总结与问题分析.....	6
1.4 研究目标与主要研究内容.....	7
1.4.1 研究目标.....	7
1.4.2 主要研究内容.....	7
1.5 技术路线图.....	8
1.6 研究创新点.....	9
第 2 章 辣椒收获机弹齿滚筒负荷试验与分析.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 试验目的和材料.....	10
2.2.1 试验目的.....	10
2.2.2 试验材料.....	10
2.2.3 载荷机理分析与传感器安装.....	11
2.3 辣椒收获机弹齿滚筒辣椒采收试验.....	13
2.3.1 试验台基本组成.....	13
2.3.2 数据采集系统.....	15
2.4 试验方法.....	15
2.4.1 试验指标确立与计算方法.....	15
2.4.2 五水平单因素试验设计.....	17
2.4.3 CCD 中心复合试验设计.....	18
2.4.4 试验结果与分析.....	19

2.5	弹齿滚筒负荷区间的定量划分	21
2.6	本章小结	22
第 3 章	辣椒收获机弹齿滚筒振动和扭矩耦合动力学模型研究	24
3.1	引言	24
3.2	基于 Lorenz-Rossler 混沌系统耦合模型设计方法	24
3.2.1	Lorenz-Rossler 扭振系统	24
3.2.2	扭振双信号的物理耦合机制	25
3.2.3	六维耦合动力学模型	26
3.3	模型参数估计方法设计	26
3.3.1	遗传算法	26
3.3.2	目标函数设计	27
3.4	信号预处理与数据重构	28
3.4.1	信号处理	28
3.4.2	基于 Takens 定理的六维相空间数据重构	30
3.5	模型参数估计	32
3.6	模型输出与实测信号的反演验证	36
3.7	本章小结	38
第 4 章	基于混沌特征的双信号融合滚筒负荷识别方法研究	39
4.1	引言	39
4.2	李雅普诺夫指数计算方法	39
4.3	不同负荷耦合系统的相位特征分析	41
4.3.1	混沌特征的相位分析	41
4.3.2	李雅普诺夫指数的区间分布特征	42
4.4	基于 SVM 的负荷识别模型	43
4.4.1	特征数据归一化处理	43
4.4.2	SVM 分类器设计	44
4.5	负荷识别性能验证	45
4.5.1	混淆矩阵识别准确率分析	45
4.5.2	负荷识别 ROC 曲线分析	46
4.6	本章小结	47
第 5 章	辣椒收获机弹齿滚筒负荷识别模型的对比与台架试验	49
5.1	引言	49
5.2	滚筒负荷识别模型对比验证	49

5.2.1 经典模型	49
5.2.2 模型性能对比结果与分析	50
5.3 负荷监测软硬件系统开发	51
5.3.1 软硬件系统搭建	51
5.3.2 功能性需求	53
5.3.3 功能界面设计	53
5.3.4 功能实现	54
5.4 滚筒负荷监测模型的试验验证	54
5.4.1 台架试验	54
5.4.2 试验结果分析	55
5.5 监测应用	56
5.6 本章小结	57
第 6 章 结论与展望	59
6.1 结论	59
6.2 展望	60
参考文献	62
致谢	67
作者简介	68

主要符号表

缩写	英文全称	中文全称
CCD	Central Composite Design	中心复合设计
CV	Coefficient of Variation	变异系数
ELM	Extreme Learning Machine	极限学习机
FIR	Finite Impulse Response	有限长单位冲激响应
GA	Genetic Algorithm	遗传算法
GS	Grid Search	网格搜索法
KPCA	Kernel Principal Component Analysis	核主成分分析
LI	Lyapunov Index	李雅普诺夫指数
LRCDM	Lorenz-Rossler Coupled Dynamic Model	洛伦兹-罗斯勒耦合动力学模型
MC	Moisture Content	含水率
RMSE	Root Mean Square Error	均方根误差
RBF	Radial Basis Function	径向基函数
SVM	Support Vector Machine	支持向量机
5-FCV	5-Fold Cross Validation	5折交叉验证
C	Penalty Factor	惩罚因子
σ	Kernel Function Width	核函数宽度
W	Feed Quantity	喂入量
Y	Picking Rate	采净率
S	Breakage Rate	破损率

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 辣椒种植发展现状

辣椒作为全球具有良好发展前景的经济作物，既是重要的蔬菜与调味品，又因适应性广、营养丰富、产业链绵长的特性，在全球范围内得到广泛应用，承载着多元饮食文化记忆，也成为多国特色农产品贸易的核心品类。中国作为全球最大的辣椒生产国和消费国，种植面积与产量常年位居世界首位，根据联合国粮农组织（FAO）数据，长期占据全球辣椒总产量的较大份额^[1]。近年来我国辣椒种植面积与产量持续增长，2021 年种植面积达 82.7 万公顷、产量 2013 万吨，2014—2021 年保持稳定增长态势。步入 2025 年，中国辣椒种植产业在市场需求升级与技术革新双轮驱动下，规模稳步扩张、格局持续优化，种植面积达 2980 万亩，产量突破 6100 万吨，占全球总产量的 45%，产业规模与全球影响力进一步提升。从种植格局来看，2025 年中国辣椒产业规模稳步增长，总产值突破 3880 亿元，年复合增长率维持在 3.5% 左右，形成了覆盖华北、西北、华南、西南的全国性产区布局，鲜食与加工需求比例约为 6:4，市场结构持续优化。区域分布上，主产区格局呈现差异化发展：贵州、河南、湖南、四川四大省份贡献全国 65% 以上产量^[2]，西北产区内部分化明显，内蒙古、甘肃大辣椒种植面积降幅达 30%，新疆则呈现“大辣椒减种、小辣椒稳增”的态势，巴州地区大辣椒面积同比降幅 30%，喀什地区 2025 年加工辣椒种植面积达 29.27 万亩，较上年增加 1.42 万亩，整体仍稳居我国核心辣椒生产基地地位。新疆凭借天山雪水灌溉、年均 3000 小时以上充足日照的独特地理气候条件，培育出皮薄肉厚、色泽鲜艳、辣香浓郁的优质品种，兼具鲜食与深加工优势，且相同品种亩产量显著高于其他地区^[3-4]。2025 年，新疆和硕县辣椒种植面积达 19.05 万亩，预计年产干椒 11 万余吨，全疆干椒产量占全国份额稳定在五分之一，持续领跑干椒原料供应市场。

1.1.2 弹齿滚筒负荷监测的工程需求与研究价值

随着辣椒种植规模的扩大，辣椒收获机的研制也逐步开展。美国率先开展这方面的研究，并于 1967 年对铃状辣椒进行商业化收获。在数十年的不断研究中，国外的辣椒

收获机逐渐趋于成熟，目前已出现数百种辣椒收获机型。而我国开展辣椒收获机的研究起步较晚，但不同类型的辣椒收获机也相继浮现于世。其中，弹齿滚筒式辣椒收获机是当下采用的主流机型之一，其通过滚筒旋转带动弹齿将辣椒从植株上分离出来从而实现收获的方式，可以达到理想的采净率^[4]和破损率^[5]。

但是弹齿滚筒式辣椒收获机作业工况复杂，辣椒植株长势不均，种植密度相异，且普遍为高密度种植^[6]。在工作过程中，其滚筒负荷状态始终处于波动，会导致负荷状态与运动参数不匹配的问题，影响辣椒的收获作业。处于高负荷状态，会使得辣椒收获机过负荷运转，作业状态不够稳定，甚至导致故障。处于低负荷状态，能源利用率不足，则会使得辣椒收获机收获效率较低，同时不同的负荷情况也会影响收获辣椒的品质，影响经济效益。当下，对弹齿滚筒式辣椒收获机滚筒负荷状态的识别主要依靠人工，依赖驾驶员的经验与技术。国内识别弹齿滚筒式辣椒收获机滚筒状态的技术较少，水平不高，主要依靠单信号识别，或是依托机器学习的识别方法。研究识别弹齿滚筒式辣椒收获机滚筒负荷状态的技术，对促进弹齿滚筒式辣椒收获机高效稳定工作有着重要意义。

因此，辣椒作为一种全球广泛种植且用途多样的作物，其采收主要依赖多种机械设备，其中，弹齿式辣椒收获机因其采收工作原理得到广泛使用，通过装备弹齿的旋转滚筒刷落植株上的果实^[7]，滚筒在采收过程中起着关键作用^[8]。田间作业时，存在复杂田间干扰，辣椒植株以及果实密度的变化会导致滚筒负载波动，既影响采收效率又可能增加果实损伤风险^[9]。为优化弹齿滚筒的作业性能并最大限度降低损伤，需将滚筒负载控制在合理范围内^[10-11]。

本课题依托国家自然科学基金、新疆生产建设兵团农业机械装备产业链专项资金项目对复杂工况下弹齿滚筒式辣椒收获机滚筒负荷监测方法进行研究。聚焦辣椒收获机弹齿滚筒负荷识别智能监测技术，针对采收作业中动态监测识别弹齿滚筒负荷情况这一关键技术展开系统性研究，旨在提高收获机对作业状态的识别能力，为合理调控收获机采收关键部件运动参数提供依据，以提高辣椒收获机收获效率和辣椒收获质量。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 旋转机械部件状态监测方法的研究现状

旋转机械状态监测（CM）是提高机械系统可靠性的一项重要工作^[12]。在农业领域，滚筒作为一种重要的旋转部件，识别预测旋转部件的运行状态，对确保机械正常运转、降低生产成本和提高生产效率至关重要^[13-14]。Xue W 等人提出基于数据累积感知生成对抗网络（DA-GAN）和相似性估计的旋转机械异常检测框架，解决传统 GAN 在数据分

布动态变化时的性能下降问题,适用于分扭传动系统等复杂旋转机械的多工况监测^[15]。Liu X 等人通过融合峭度引导变分模态分解 (Kurtosis-Guided VMD) 和多分支卷积神经网络 (MB-CNN),从电机电流信号中提取故障特征,解决变速工况下轴承故障诊断难题,特别适用于风力发电机组等难以安装振动传感器的场景^[16]。Zhang Y 等人提出动态多尺度 Transformer 网络,通过自适应尺度感知机制捕捉振动信号中的多尺度故障特征,显著提升强噪声环境下旋转机械故障诊断准确率,在齿轮箱和滚动轴承测试中表现优异^[17]。中国科学院沈阳自动化所通过引入谱折叠网络与语义投影机制,将振动信号与语言模型语义空间深度融合,在统一体系下完成异常检测、故障诊断和维护建议多任务推理,具备良好泛化性与可解释性^[18]。陈国达等构建了面向误差运动监测的气体静压主轴数字孪生体,开发融合机理与数据的主轴误差运动预测模型,解决数据模型缺乏可解释性问题,实现精确且透明的主轴误差运动监测与预测^[19]。邬娜等人系统综述小样本学习在旋转机械故障诊断中的应用,重点分析元学习、迁移学习、数据增强三类方法,总结变工况、多部件、强噪声环境下小样本故障诊断的关键技术与挑战^[20]。Lei Y 等人全面梳理深度学习在旋转机械状态监测与故障诊断中的最新进展,涵盖 CNN、RNN、GAN、Transformer 等主流模型,分析不同模型在特征提取、故障分类、剩余寿命预测中的优缺点^[21]。Yu M 等人通过融合自适应滤波 (AF)、变分模态分解 (VMD) 和 K 近邻 (KNN) 算法,实现转子-定子碰摩故障的精准识别与定位,解决大型旋转机械中常见的二次故障诊断难题,在汽轮机、发电机等设备中验证有效^[22]。张珂等人将振动信号转换为时频图像,采用 RepVGG 网络提取故障特征,通过结构重参数化技术提升模型推理速度,同时保持高精度,适用于工业现场实时轴承故障诊断^[23]。何清波等人系统总结旋转机械故障诊断中的振动信号模型,包括周期信号模型、循环平稳信号模型、自适应谐波模型等,分析定工况和变工况条件下轴承和齿轮的典型振动信号模型及对应处理方法,为故障诊断算法设计提供理论基础^[24]。

主流研究中旋转机械的信号数据来源主要为扭矩和振动两大类数据,构建两者耦合的非线性动力学模型能够很好地表征旋转机械的工作状态^[25-26]。Jabbar Firouzi 等为了研究船用螺旋桨轴系的扭转-纵向振动,采用非有限元分布参数建模和牛顿-欧拉法推导悬臂叶片和旋转主轴的动力学方程,开发了一个综合数学公式^[27]。遗传算法被广泛地应用于非线性动力学模型参数的识别和耦合系统的多目标参数优化^[28],例如 Wei-Der Chang 等提出了一种利用改进的实数编码遗传算法 (GA) 进行非线性系统参数估计的搜索方法^[29]。有人提出了一种基于转子动力学和计算智能的新型故障诊断策略,采用集中质量法推导了含有四种典型故障的转子-轴承系统的动力学方程,并通过多种群遗传算法优化的模糊支持向量机 (FSVM) 对系统状态进行自动识别^[30]。同时动力学的混沌特征被引入用于表征旋转机械不同工况, Xiaolu Chen 等人证明机器学习模型具有相同

的关联维度和递推时间,通过共享共同信号实现了机器学习模型之间的同步、级联同步和耦合同步,揭示了不同机器学习模型在混沌系统表征与建模方面的等效性^[31]。Zhenya W 等人为提升旋转机械故障诊断的泛化能力,通过引入相位熵作为机械信号复杂度测量的新方法,并将其扩展为精细化时移多尺度相位熵,该扩展方法能有效捕捉多尺度动态特征信息,全面反映设备运行状态^[32]。Z. Rahmani 等人提出了一种新的离散自适应方法,用于控制耦合映射格中的时空混沌,该方法是一种基于准滑动模式控制设计的自适应控制^[33]。这是一种利用耦合映射格子建模的时空混沌系统控制的通用方法,且对未建模的动态、未知参数和有界扰动具有鲁棒性。尽管扰动边界未知,基于李雅普诺夫直接法的受控系统的稳定性已被证明。Shuang Liu 等通过拉格朗日-麦克斯韦方程建立轧机主传动系统在电磁激励下的强非线性扭转振动模型,通过混沌特征来表征耦合系统周期运动的变化规律^[34]。

1.2.2 多信号融合技术在状态监测中的研究现状

随着机器学习算法研究的发展,许多研究者已针对机械旋转部件的负载状态识别开展过研究,同时,多源数据融合技术被广泛应用于旋转机械负荷识别^[35-36]。Zheng M 等为了快速、准确地识别联合收割机脱粒分离装置的负荷状态,提取时域、频域和时频域特征并融合为全域特征,以表征脱粒分离装置负载工况的整体信号属性,使用主成分分析(PCA)等降维方法融合后,输入机器学习模型^[37]。深度学习神经网络技术也有广泛应用,Zekun W 等设计了一种时频对称点模式变换技术,将原始振动信号转换为二维表示并构建了一个多尺度特征融合模块,提取低级特征,降低后续注意力计算的复杂度结合 Transformer 模型在捕捉全局依赖关系方面的优势,深度挖掘长周期故障信息^[38]。依靠采集单信号或多信号数据融合后训练模型,虽然解决了滚筒负荷的识别或预测问题,但受限于模型性能的泛化能力,深度学习神经网络往往受限于数据量的大小^[39]。

Liu Z 等基于两阶段混合状态空间模型的自数据驱动剩余寿命预测方法,第一阶段构建融合机械动力学机理与数据驱动的混合状态空间模型,精准捕捉时变工况下旋转机械运行状态的动态演化特征;第二阶段引入自数据驱动策略,仅利用设备自身运行的健康监测数据完成模型参数迭代优化,无需依赖大量同类设备的历史故障数据与标签信息,通过多维度状态特征的动态拟合与趋势外推,实现时变工况下旋转机械剩余寿命的高精度预测^[40]。

陈闯,李先锋,史建涛,等基于柔性残差神经网络的滚动轴承智能故障诊断方法,针对传统残差神经网络残差连接固定、特征提取冗余度高的问题,对残差模块进行柔性优化,引入自适应残差权重分配机制,根据轴承振动信号的故障特征复杂度动态调整残

差支路的特征传递权重；同时简化网络深层层级结构，删除冗余卷积层，在降低模型计算复杂度、提升推理速度的基础上，增强网络对轴承不同故障类型（点蚀、剥落、裂纹）及不同故障程度的特征差异化提取与融合能力，适配工业现场实时监测的算力与精度需求^[41]。

Xu Y 等人基于时频双域预测的自监督学习列车轴承故障诊断方法，构建无标注数据驱动的时频双域自监督学习框架，首先对列车轴承振动信号进行小波时频变换，将一维时域信号转化为包含丰富故障特征的二维时频图，形成时域信号-频域时频图双域数据；其次设计双域自监督预测任务，分别完成时域振动信号的精准重构与频域时频图的关键特征预测，通过无标注数据的自监督学习实现故障特征的自动挖掘与表征；最后在预训练模型基础上，利用少量标注数据进行微调，完成列车轴承故障类型的精准识别，解决工业现场列车轴承监测数据标签稀缺的问题^[42]。

Chen Z M 等人基于改进可视图与图同构网络的变工况轴承故障诊断方法，针对传统可视图在变工况下易出现拓扑特征失真、故障特征表征能力弱的问题，首先对传统可视图进行改进，优化节点构建规则（以信号极值点为核心节点）与边权分配策略（融合信号幅值差与时间差的加权边权），将一维变工况轴承振动信号转化为能有效表征故障特征的图结构数据，实现非欧氏空间下的故障特征转化；其次引入图同构网络，利用其对图结构拓扑特征的强挖掘能力，摆脱对工况先验信息与信号特征工程的依赖，直接从图结构中提取与工况无关的本质故障特征；最后通过图特征的聚类与分类，实现变工况下轴承不同故障类型的精准诊断^[43]。

1.2.3 农业机械状态监测识别研究现状

尹彦鑫（2014）针对少免耕播种机牵引阻力的监测，提出了一种能够实时采集信号、无线传输数据、现场移动监测、远程同步监测的少免耕播种机牵引阻力监测系统，采用无线传感网络技术（wireless sensor network, WSN）实现传感器信号采集和数据短距离无线传输，采用嵌入式技术开发无线数据监测移动终端，实现牵引阻力的现场监测以及数据转发^[44]。陈进等人针对联合收获机工况复杂、需要对其主要部件进行工况监测的问题，开发了一种基于 Android 手机的联合收获机主要部件工况监测系统，可以获得脱粒滚筒转速、输送机转速及前进速度等作业参数，并实现在 Android 手机上接收^[45]。丁幼春等人以油菜精量直播机为对象，使用多个种子流传感器和显示终端开发了播种量监测系统，可以显示种子流的排种时间间隔、排种频率、排种总量以及漏播指数和合格指数等参数，从而解决了油菜机播种过程中需要对作业质量及播种量进行监测的问题^[46]。Xu L 等人选用压电型陶瓷作为敏感元件，研发了多块清选损失传感器，并开发了基于冲击