

分类号：

密 级：公开

学 号：20232108031

单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于数字孪生模型的齿轮箱综合故障诊断 方法研究及系统设计

学位申请人

耿世强

指 导 教 师

李志刚 教授

申请学位门类级别

专业硕士

专 业 名 称

电子信息

研 究 方 向

计算机技术

所 在 学 院

信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子

2026年05月

分类号：TP3
学号：20232108031

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于数字孪生模型的齿轮箱综合故障诊断 方法研究及系统设计

学位申请人	耿世强
指导教师	李志刚 教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

**Research on Comprehensive Fault Diagnosis Methods for
Gearboxes Based on Digital Twin Models and System Design**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Geng Shiqiang

(Electronic Information)

Dissertation Supervisor: Prof. Li Zhigang

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

本人所提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： 耿世强

时间：2026年 5月 24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： 耿世强

时间：2026年 5月 24日

导师签名： 李正刚

时间：2026年 5月 24日

摘要

随着智能制造与数字化转型的深入推进，数字孪生技术作为物理信息融合的核心使能手段，为复杂装备的故障诊断提供了新的研究范式。齿轮箱作为传动系统的关键部件，其健康状态直接影响生产线的稳定运行，然而在实际工业场景中，故障样本稀缺、工况多变、数据获取困难等问题制约了传统诊断方法的工程应用。为此，本研究以某企业齿轮箱的典型动力学特性为背景，基于物理原型实验台开展研究，开展综合故障诊断方法研究，旨在构建“虚实融合、以虚诊实、数据驱动”的智能诊断系统。

本文首先基于 PT400mini 齿轮轴承实验台，通过 SolidWorks 与 ANSYS 平台构建其高保真三维模型与动力学仿真模型，实现了故障数据的虚拟注入与实体采集，构建了涵盖正常、轴承故障、齿轮故障及综合故障 7 种典型故障模式，总计 6480 组振动信号样本的数据集。

在此基础上，本文提出一种融合自适应多尺度卷积网络（A-MSCNN）与 Informer 时序编码器的双支路并行诊断模型，通过双向交叉注意力机制实现局部特征与全局依赖的深度融合，在仿真与实测数据上均表现出优于传统方法的分类性能。实验结果表明，该模型在实测数据集上平均诊断准确率达 95.61%，在不平衡 CFD 数据集上 F1 分数达 91.58%，综合性能显著优于宽核深度卷积神经网络（Wide Deep Convolutional Neural Network, WDCNN）、一维残差网络（One-Dimensional Residual Network, 1D-ResNet）等传统经典诊断模型。

针对实际工况中跨工况诊断的情况，进一步设计了层次化域对抗迁移学习（Hierarchical Domain Adversarial Transfer Learning, HDATL）方法，针对齿轮箱振动信号的多尺度特性与故障诊断任务的特殊需求，提出了层次化特征对齐机制与类感知对抗训练策略，有效提升从单一工况到多工况的知识迁移能力与诊断精度。实现从仿真数据到实测数据的特征分布对齐与跨工况自适应诊断。实验结果表明，该方法在六种跨工况任务中平均准确率达到 92.37%，显著提升了模型在变工况下的泛化能力。

最后，基于 Unity3D 平台开发了一套集成可视化监测、故障诊断与交互控制功能的数字孪生系统，通过 Modbus RTU 协议实现实时数据通信，并结合 MySQL 数据库进行状态管理。系统通过黑盒测试验证了其功能可行性与稳定性，实现了从数据感知、智能诊断到决策反馈的闭环运维。本研究为齿轮箱智能运维提供了一套可扩展、可迁移的数字孪生解决方案，对推动制造业数字化转型具有积极的工程应用价值。

关键词：数字孪生；故障诊断；多尺度卷积网络

Abstract

With the deep advancement of intelligent manufacturing and digital transformation, digital twin technology, as a core enabling tool for physical-information integration, has established a novel research paradigm for fault diagnosis of complex equipment. As a critical component of transmission systems, the operational integrity of gearboxes directly determines the stable operation of production lines. Nevertheless, practical industrial scenarios are plagued by challenges such as scarce fault samples, fluctuating operating conditions, and limited data accessibility, which severely restrict the engineering application of conventional diagnostic methods. Against this backdrop, this study focuses on the dynamic characteristics of industrial gearboxes and conducts research based on a physical prototype test bench. It aims to develop an integrated fault diagnosis approach and construct an intelligent diagnostic system featuring virtual-physical integration and data-driven analysis.

This study first establishes high-fidelity three-dimensional models and dynamic simulation models of the PT400mini gear and bearing test bench using SolidWorks and ANSYS. Virtual fault injection and physical data acquisition are realized, and a comprehensive dataset is constructed. The dataset encompasses seven typical fault conditions, including normal operation, bearing faults, gear faults, and composite faults, consisting of 6,480 vibration signal samples in total.

On this basis, a dual-branch parallel diagnostic model integrating an adaptive multi-scale convolutional network (A-MSCNN) and an Informer temporal encoder is proposed. A bidirectional cross-attention mechanism is employed to achieve deep fusion of local features and global dependencies. The proposed model demonstrates superior classification performance on both simulated and measured datasets. Experimental results reveal that the model achieves an average diagnostic accuracy of 95.61% on measured datasets and an F1 score of 91.58% on imbalanced CFD datasets. Its comprehensive performance significantly outperforms traditional diagnostic models such as wide deep convolutional neural networks (WDCNN) and one-dimensional residual networks (1D-ResNet).

To address the challenge of cross-condition diagnosis in practical operating environments, a hierarchical domain adversarial transfer learning (HDATL) approach is further proposed. Targeting the multi-scale characteristics of gearbox vibration signals and the specific requirements of fault diagnosis tasks, a hierarchical feature alignment mechanism and a class-aware adversarial training strategy are designed. This approach effectively enhances knowledge transfer capability across varying operating conditions and improves diagnostic accuracy, enabling feature distribution alignment between simulated and measured data as well as cross-condition adaptive diagnosis. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves an average accuracy of 92.37% across six cross-condition tasks, substantially

improving the generalization capability of the model under variable operating conditions.

Finally, a digital twin system integrating visual monitoring, fault diagnosis, and interactive control functions is developed on the Unity3D platform. Real-time data communication is realized via the Modbus RTU protocol, and a MySQL database is adopted for equipment condition management. Black-box testing verifies the functional feasibility and operational stability of the system, enabling a closed-loop operation and maintenance framework covering data perception, intelligent diagnosis, and decision feedback. This research provides a scalable and transferable digital twin solution for intelligent operation and maintenance of gearboxes, offering valuable practical implications for advancing the digital transformation of the manufacturing industry.

Key words:Digital Twin; Fault Diagnosis; Multi-Scale Convolutional Network

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	I
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 数字孪生国内外研究现状.....	2
1.2.2 制造业故障诊断国内外研究现状.....	3
1.3 研究内容与技术路线.....	5
1.3.1 研究对象及内容.....	5
1.3.2 技术路线.....	6
1.4 本文组织结构.....	7
第 2 章 相关技术及理论.....	9
2.1 数字孪生理论介绍.....	9
2.1.1 数字孪生五维模型.....	9
2.1.2 数字孪生的关键技术.....	10
2.2 深度学习相关技术介绍.....	11
2.2.1 高效的长序列时间序列预测模型（Informer）.....	11
2.2.2 多尺度卷积神经网络（MSCNN）.....	12
2.3 迁移学习相关理论介绍.....	13
2.3.1 迁移学习的定义.....	13
2.3.2 迁移学习的分类体系.....	14
2.3.3 核心迁移方法与基础理论.....	14
2.4 本章小结.....	16
第 3 章 基于 A-MSCNN-Informer 的故障诊断模型研究.....	17
3.1 基于数字孪生模型的故障特征数据生成.....	17
3.1.1 实验台搭建.....	17
3.1.2 三维模型构建.....	20
3.1.3 基于 ANSYS 的实验台动力学模型.....	21

3.1.4	实验台故障数据生成	23
3.1.5	实体实验台数据结果及验证	26
3.1.6	孪生模型数据结果及验证	28
3.2	故障诊断模型设计	29
3.2.1	模型整体结构设计	29
3.2.2	时频域双重特征增强机制	30
3.2.3	A-MSCNN-Informer 双支路并行网络	32
3.2.4	基于双向交叉注意力机制的特征融合	34
3.2.5	全连接层	36
3.3	模型实验设置和对比分析	37
3.3.1	实验设置	37
3.3.2	结果分析	39
3.4	本章小结	43
第 4 章	跨工况迁移诊断方法研究	44
4.1	传统域对抗网络及其局限	44
4.1.1	传统 DANN 基本原理	44
4.1.2	在齿轮箱故障诊断中的主要局限	45
4.2	层次化类感知域对抗网络	45
4.2.1	层次化特征对齐机制	45
4.2.2	类感知域对抗训练	46
4.2.3	自适应权重分配与稳定化训练	47
4.3	整体优化目标与训练流程	48
4.4	迁移验证实验设计与结果分析	49
4.4.1	数据说明与工况划分	49
4.4.2	实验设置	50
4.4.3	结果分析	51
4.5	本章小结	53
第 5 章	基于数字孪生故障诊断系统实现	54
5.1	系统需求分析	54
5.2	系统设计	55
5.3	数字孪生模型映射方法实现	56
5.3.1	数据传输通信	57
5.3.2	数字孪生行为模型构建	58
5.4	系统功能模块实现	59

5.4.1 数据库设计	59
5.4.2 用户管理模块	60
5.4.3 状态监测模块	61
5.4.4 故障诊断模块	61
5.5 系统功能测试	62
5.6 本章小结	63
第 6 章 总结与展望	64
6.1 总结	64
6.2 展望	64
参考文献	66
致谢	71
作者简介	72

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着物联网、人工智能等信息技术的快速发展，计算能力有了质的提高，计算机技术也被应用到了越来越多的行业，在制造业、智慧城市、医疗服务等领域创造了巨大的价值。根据世界经济论坛《未来生产报告》显示，数字化技术驱动的先进制造业已成为国家竞争力的关键要素，主要工业国家相继推出制造业升级战略：德国实施“工业 4.0”构建智能生产系统，美国通过《先进制造业国家战略计划》重塑制造优势，英国制定“工业 2050 战略”推动价值创造模式转型。尽管战略路径各异，但各国均致力于实现制造系统物理空间与信息空间的深度融合，推动制造业向智能化、数字化、网络化方向演进。

作为全球最大的制造业经济体，我国在《中国制造 2025》战略纲领中明确提出“以新一代信息技术与制造业深度融合为主线”的发展路径。根据工信部《“十四五”智能制造发展规划》评估数据显示，我国智能制造发展已取得阶段性成果：关键装备市场满足率超过 50%，培育形成 40 余家超十亿级系统解决方案供应商，工业互联网平台应用普及率达 14.7%。典型示范项目数据显示，实施智能化改造可使生产效率提升 45%、产品不良率降低 35%、研制周期缩短 35%，显著验证了数字化转型的经济效益^[1]。然而，当前发展仍面临三方面核心挑战：其一，技术供给与产业需求存在结构性错配，装备数字化率不足 50%；其二，自主创新能力亟待提升，智能制造标准国际贡献率仅为 9.8%；其三，应用深度呈现行业分化，中小企业智能化渗透率低于 30%。这些问题制约着我国制造业向全球价值链高端攀升^[2]。

在此背景下，数字孪生技术（Digital Twin）作为物理信息融合的核心使能技术，正引发学术界和产业界的共同关注。数字孪生是指针对物理世界中的实体，通过数字化的手段构建出一个高保真的数字实体，借此实现对某一物理实体的优化、分析和了解，数字孪生综合了物联网技术、建模仿真和人工智能等信息技术。Gartner 连续两年将其列为十大战略科技趋势，德国工业 4.0 体系将其作为核心组件，国际领先企业如 GE、西门子已开发 Predix、MindSphere 等工业级应用平台。我国在《智能制造发展规划（2021-2035）》中明确提出“突破数字孪生等关键核心技术”的发展目标，中国科协将其列为十大前沿科学问题。可以预见，数字孪生将推动制造业迈向“虚实共生、以虚控实”的新范式，为我国制造业转型升级提供关键支撑，有关数字孪生的研究正处于热潮。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 数字孪生国内外研究现状

数字孪生技术作为一种基于物理对象的数字模型技术，在国内外均得到了广泛的研究和应用。例如产品设计、工业制造、现代医疗等，其中，数字孪生主要被应用在制造业上，数字孪生的概念也在这个过程中不断发展。

最初在 2012 年，美国宇航局和美国空军将“数字孪生”定义为一个集成了多物理场、多尺度和概率的模拟过程，并将该技术应用于飞行器的设计、运行和维护，从而大大提高了飞行器的安全性和可靠性^[3]。

在理论与框架构建方面，北京航空航天大学的陶飞教授^[4]构建了标准框架体系，确立了建模规范原则，系统阐述了相关理论基础。此外，该研究还创新性地建立了由物理实体、虚拟模型、数据交互、网络连接及功能服务五个维度构成的数字孪生架构模型。除此之外，他还提出了一个数字孪生驱动的 PHM 框架，该框架有效地利用了数字孪生便捷的交互机制和数据融合^[5]。

在数字孪生的应用方面，LIU Y 等人^[6]构建了滚动轴承的数字化孪生模型，结合空气动力学原理，所设计的动力学模型能够有效预测轴承打滑现象，显著减少了维护及运行费用。这一方法的可行性在风力发电机实测数据验证的基础上得到了充分的确认，齐等人^[7]讲解数字孪生服务与智能制造如何融合。刘等人^[8]将物理系统建模与分散式半物理模拟技术相融合，结合双级迭代协调机制，针对自动飞行任务管理系统的功能设计性能，开发出一种数字孪生驱动的流水车间制造系统设计方法。Xu 等人^[9]针对数字孪生转子模型的精度问题，引入基于参数敏感性分析的模型修正策略，完成了转子数字孪生模型的构建，研究表明，该模型可有效应用于设备故障诊断及自适应退化分析任务。Wang 等人^[10]则针对旋转机械故障诊断需求，提出了一种全新的数字孪生模型，同时构建了数字孪生驱动的设备故障诊断与趋势预测框架，借助该模型可实现旋转机械不平衡故障的精准诊断。叶伦宽等人^[11]提出了一种应用于旋转机械故障诊断全新的数字孪生模型和数字孪生驱动的设备故障诊断和趋势预测框架，通过该模型可以实现旋转机械不平衡故障的诊断。Farhat 等人^[12]所开发的转子滚珠轴承系统数值模型经实验验证表明：更新后的数字孪生模型可实现自适应退化分析，其生成的仿真数据可替代实验数据用于构建机器学习预测模型。该方法通过模拟驱动机器学习框架，突破了传统故障诊断算法对历史运行数据的依赖，为缺乏长期监测数据的旋转机械系统提供了可解释的故障特征提取方案。金秋^[13]以铸造生产线效能提升为目标，构建了以改进遗传算法为核心的数字孪生仿真优化策略，为铸造生产线的性能优化提供了新的技术路径，使生产平衡率显著提

升,生产平滑指数大幅减小,同时算法的收敛速率及结果均得到明显改善。在农业领域, Monteiro J 等人^[14]提出了一个在可持续农业中实施数字孪生的模型,为垂直农业联合创造支持物联网的结构的物理层和数字层,提高了生产力以及促进节能。在建筑领域, Khajavi^[15]进行了在研究数字孪生在包括建筑生命周期管理方面的扩展,创建和测试了办公楼立面元件的有限数字孪生。在智慧城市领域, White 等人^[16]开发了爱尔兰都柏林区域的开放式数字孪生智慧城市框架,进一步拓展了虚拟新加坡项目中的数字孪生理念,并利用 3D 建模技术实现了洪水与人群动态的高仿真模拟。

1.2.2 制造业故障诊断国内外研究现状

故障诊断技术已经历了从初级阶段到智能化阶段的显著发展。初期,故障诊断主要依赖专家的感官和专业经验,存在很大的主观性和局限性。随后,随着传感器技术、动态测试技术、信号处理及建模处理等技术的发展,故障诊断技术进入了常规诊断阶段,能够更准确地识别和定位故障。近年来,随着人工智能技术的兴起,故障诊断技术迎来了智能化发展阶段,通过专家系统、人工神经网络等先进技术,实现了对复杂系统的高效、精准诊断。总的来说,目前针对机械设备的故障诊断方法主要有两大类型:基于物理模型分析的诊断方法和基于状态数据的诊断方法。

(1) 基于物理模型的故障诊断

基于物理模型的故障诊断技术,核心在于深度解析机械系统的运动学与动力学机理,通过构建贴合设备实际运行状态的物理及数学模型,借助模型求解与仿真分析获取状态表征参数,以此实现故障的有无判别、定位及类型识别。该方法能够直接剖析设备的故障演化逻辑与性能退化规律,无需依赖海量故障样本,在故障发生率低、样本获取困难的关键设备诊断场景中应用广泛。

Nguyen 等^[17]为了降低工业的运行和维护成本,采用基于物理的液压系统级诊断方法,从而提供改进的故障诊断能力。物理信息还可以更好地将诊断解决方案约束到物理领域。以高压给水系统故障诊断为例,进行了实例分析。验证了约束检测和识别传感器故障的能力。邓红磊^[18]针对铣削工艺,利用数字孪生技术进行建模,得到高保真度的铣削工艺设备模型,并且在 Web 端搭建了应用平台,实现了工艺的全程监控。柳宇翀^[19]针对液压系统在制造中容易出现故障,对液压系统进行仿真,实现了故障的高准确度诊断。吴家腾等人^[20]为实现农业收获机主传动齿轮箱故障及时有效地监测诊断提出基于物理模型驱动优化的小波包分解方法。通过对实验数据及耑头收获机齿轮故障信号的包络谱分析,验证了该方法在收获机齿轮故障诊断中的有效性。朱观宏^[21]提出的智能诊断方案,将同步运行物理模型与小样本数据驱动相结合,针对冷却系统构建了基于其物理机理的简化模型。该方案以模型实时预测水温与实际水温的残差作为故障诊断的关键特征,

通过支持向量机对特征进行分类,实现对冷却系统故障根源的精准识别。Xu 等人^[22]将轴承动力学模型与生成的对抗网络相结合,构建轴承动力学模型,模拟不同工况下的振动数据,可以解决新条件下的零镜头问题,具有优异的诊断性能。Liu D 等人^[23]开发了基于贝叶斯网络的隔膜故障诊断模型,此模型引入了 Sequential Monte Carlo 模拟和物理模型,以克服现场问题,例如缺少分离器故障数据和专家无法提供准确的经验知识。

尽管基于物理模型的故障诊断技术具有广泛的应用前景和深远影响,但仍面临一些挑战和问题。例如,物理模型的建立需要深入的运动学和动力学知识,且需要大量的实验数据来验证和完善。此外,机械系统的运行状态受到多种因素的影响,如温度、湿度、负载变化等,这些因素的变化会对故障诊断的准确性产生影响。

(2) 基于数据驱动的故障诊断

基于数据驱动的故障诊断是现代工业智能化运维的核心技术,它摆脱了传统方法对精确物理模型和专家经验的依赖,直接从工业设备采集的振动、温度、电流等海量运行数据中挖掘故障规律,实现设备健康评估、早期预警、故障识别与根因分析。故障诊断技术先后经历了基于物理模型、基于专家知识和基于数据驱动三个阶段,前两者分别受限于复杂系统建模难度大、专家知识获取更新慢的短板,而数据驱动方法仅通过分析历史数据就能自动学习故障特征,凭借更强的适应性成为行业主流。其核心流程包括数据预处理、特征工程、模型构建与部署,通过清洗增强数据、提取手工或自动特征,结合监督、无监督或半监督学习模型完成诊断。该技术具备无需机理建模、早期故障检测能力强、可扩展性好等优势,但仍面临工业数据质量差、关键设备故障样本稀缺、变工况泛化能力不足及深度学习结果可解释性欠缺等挑战,这些也是其实现大规模工业化落地需重点攻克的方向。目前常用的基于数据驱动的故障诊断方法主要分为以下几类。

信号处理的技术主要针对采集的原始信号进行处理,主要方法包括希尔伯特变换、傅里叶、形态学法、小波变换等。孙抗等人^[24]将自回归最小熵解卷积的共振特征增强技术与一维卷积神经网络相结合,构建了面向风电齿轮箱的高精度故障诊断方法,该方法在风电齿轮箱故障特征提取任务中展现出优异性能。面向齿轮箱故障诊断场景,吴胜利等人^[25]提出了一种结合 SDP (Symmetrized Dot Pattern) 与 MCNN-LSTM 的智能诊断方案。该方案以东南大学齿轮箱数据集为测试基础,验证了其在齿轮与轴承典型故障特征提取任务中的有效性。谢锋云等人^[26]提出一种基于多源信息融合连续小波和 TransXNet 三相异步电机故障诊断新方法,通过提取和整合丰富的特征来提高诊断性能稳定性。He Yu 等人^[27]提出了一种新的振动信号融合算法,利用改进的经验小波变换和方差贡献率来融合三通道振动信号,用于液压泵的弱故障检测。霍琳等人^[28]面向异步电机故障诊断任务构建含注意力机制的 MSCNN-BiLSTM 诊断模型:通过通道注意力机制优化学习流程,采用 3 种尺度提取数据特征,结合双向长短期记忆网络捕捉时序特征;引入自注意力机制聚焦关键特征,残差模块抑制噪声干扰,经归一化指数函数分类输出

诊断结果, 实验验证该模型可有效提取故障特征。黄跃珍等人^[29]针对 SCARA 机器人的故障诊断场景, 提出了一种基于机器学习的优化诊断方法: 通过萤火虫算法对支持向量机的核函数参数与惩罚系数进行寻优, 构建得到 FA-SVM 模型, 最终利用该模型完成 SCARA 机器人的故障诊断。Polenghi 等^[30]针对机器人出现功能故障影响它们的运行导致轨迹异常的问题, 采用无监督的 OPTICS 聚类方法检测出现运行轨迹异常的机器人, 从而进行故障的诊断和维修, 提高生产效率。韩婷^[31]提出采用改进蚁群优化算法对深度卷积神经网络的超参数进行寻优, 有效改善了数控机床主轴故障诊断中存在的诊断效率低、识别精度不足的问题。Peng^[32]将深度残差网络与多源信息融合技术相结合, 应用于滚动轴承与齿轮的故障诊断任务, 实验验证了该方法在诊断准确率和抗干扰鲁棒性方面的优异性能。Yaguo 等^[33]提出了一种用于机器智能诊断的两阶段学习方法。所提方法分别通过电机轴承数据集和机车轴承数据集进行了验证。结果表明, 所提方法获得了相当高的诊断精度, 优于现有的电机轴承数据集方法。张龙等人^[34]提出一种改进 ResNet18 模型: 采用 sigmoid 加权双阻尼小波构建小波卷积层, 嵌入轻量级局部注意力机制, 实现与残差网络的融合, 建立了既可物理解释又与神经网络兼容的 Bdw-ResNet 模型以及故障诊断的完整流程。武福等人^[35]提出一种基于 YOLOv8s 的轻量化轨道扣件状态检测模型, 旨在提高检测准确率和实时性。

基于数据驱动的故障诊断方法是一种有效且高效的故障诊断方法, 它能够通过利用设备或系统的运行数据来揭示潜在的故障模式, 并提供准确的故障诊断和解决方案。随着技术的不断发展和完善, 这种方法将在更多领域得到广泛应用和推广。然而数据驱动的故障诊断方法仍存在一定的局限性, 数据驱动方法的性能高度依赖历史数据的质量和数量。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究对象及内容

本研究首先对新疆某滴灌设备制造企业进行了实地调研, 通过与车间技术人员的深入交流及设备运行数据分析, 明确了生产线的核心组成及其典型故障模式。该企业生产线主要由上料系统、筛选供应机组、挤出机机组、液压交换器、冷却水槽与去水装置、牵引机组以及为整条生产线提供动力的电机组等模块构成。

根据设备运行记录和维修数据统计, 车间故障主要分为机械传动故障和驱动系统故障两大类。其中机械传动故障占比约 65%, 主要表现为上料系统卡料或输送异常、传动装置(如齿轮箱、轴承、皮带等)磨损或断裂、牵引机组同步性失调等问题; 驱动系统

故障占比约 35%，主要包括电机过载或绕组短路、变频器参数异常以及液压系统压力不稳定等故障^[36]。

综上所述本文以企业齿轮箱的典型动力学特性为背景，基于物理原型实验台开展研究。这一选择主要基于三方面考虑：首先，齿轮箱作为传动系统的核心部件，长期承受交变载荷，容易发生齿面磨损、点蚀、断齿等典型故障，具有显著的故障敏感性；其次，齿轮箱的振动、温度和噪声等状态信号易于采集和监测，为构建多物理量融合的故障诊断模型提供了良好的数据基础；最后，从工程应用价值来看，齿轮箱故障往往会导致整条生产线停机，其健康状态直接关系到生产效率和经济效益。

但是研究过程中难以采集到实际生产过程中的故障数据，并且由于在实际生产过程中，对真实齿轮箱进行直接实验存在诸多限制，如成本高昂、环境控制复杂以及难以实现多工况参数的可控调节，因此需要采用一种具备较高相似性与可操作性的实验平台予以替代。所以本研究将以齿轮箱为参考，搭建的齿轮轴承故障实验台为具体研究对象，通过数字孪生技术构建其高保真仿真模型，模拟各类典型故障工况，为后续智能诊断算法的开发和验证提供数据支持。这种研究思路能够解决实际生产中故障样本不足的问题。针对齿轮箱研究内容如下：

(1) 孪生模型构建和故障数据的获取。利用三维建模软件对实验台构建三维仿真模型。再对模型进行有限元分析并通过故障注入得到虚拟数据。再利用 PT400mini 齿轮实验台，通过振动传感器获取正常及故障齿轮真实数据。

(2) 针对齿轮箱故障诊断中特征提取与时序建模的不足，改进一种融合多尺度卷积与注意力时序编码的 A-MSCNN-Informer 模型，通过双向交叉注意力实现局部特征与全局依赖的深度融合，并引入域对抗迁移学习提升模型在不同工况下跨域诊断能力。

(3) 面向齿轮箱的数字孪生实时监控与故障报警系统开发。基于 Unity 平台开发了一套数字孪生系统，通过与后端数据库的高效数据交互，实现离心泵运行状态的实时监测、故障自动报警，同时可对齿轮箱电机的运行状态进行反向控制，完成了从状态感知到控制反馈的全流程闭环管理。

1.3.2 技术路线

本文针对齿轮箱关键零部件故障诊断，利用数字孪生方法构建孪生模型实现数据获取，使用深度学习的方法实现数故障诊断。在对研究背景以及相关数字孪生技术和故障诊断方法进行归纳和总结的基础上确定技术路线，相关技术路线图如图 1-1 所示。