

分类号：
学号：20222108038

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于数字孪生的滴灌制造设备关键零部件故障 检测系统设计与实现

学位申请人	李鹏博
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
2025年05月

分类号：
学号：20222108038

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于数字孪生的滴灌制造设备关键零部件故障 检测系统设计与实现

学位申请人	李鹏博
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
2025年05月

**Design and Implementation of Key Component Fault Detection
System for Drip Irrigation Manufacturing Equipment Based on
Digital Twins**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Li Peng-bo

(Electronic Information)

Dissertation Supervisor: Prof. Li Zhi-gang

May, 2025

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：李鹏博

时间：2025年5月27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：李鹏博

时间：2025年5月27日

导师签名：

李志刚

时间：2025年5月27日

摘要

近年来,新一代信息技术的蓬勃发展极大地加速了制造业智能化转型的步伐。在此背景下,“中国制造 2025”战略明确强调了深化信息技术在制造业全方位应用的重要性,其中,将设备故障诊断技术与计算机技术相融合,已成为顺应时代潮流的必然趋势。然而,故障诊断领域面临的一大难题在于数据获取的困难,加之生产设备的精密性和专业性,其高昂价值使得通过“破坏性”手段获取数据的方法变得不切实际。因此,探索一种成本效益高的数据获取途径显得尤为迫切。当前,结合数字孪生技术与人工智能算法进行故障诊断已成为行业研究的焦点。本文对现有的故障诊断方法进行了分析,认真学习了数字孪生和深度学习的相关技术,并将其应用到滴灌设备制造企业,最终成功开发出一套基于诊断模型的故障诊断系统。主要研究内容涵盖以下方面:

(1) 孪生模型构建与数据获取策略。针对滴灌设备制造企业故障数据稀缺的难题,本文采用数字孪生技术,以滴灌设备生产线驱动系统的关键部件——轴承为研究对象。通过对轴承常见故障的分析,选定轴承点蚀故障作为研究切入点。利用 Ls-dyna 软件构建孪生模型,并通过故障注入技术模拟故障发生,驱动模型运行以收集故障数据,从而有效解决了数据获取难题。

(2) 数据扩充模型的创新研究。尽管孪生模型能够解决数据获取问题,但所得数据仍属于小样本范畴,难以支撑深度学习模型的充分训练。为此,本文提出了一种融合卷积注意力模块和自注意力模块的生成对抗网络模型,旨在提升生成数据的质量。实验结果显示,在三类故障上生成数据的 FID 分数达到了 41.989、64.966 和 46.273。生成数据帮助诊断模型达到了 91.66%的精确度,且在 t-SNE 可视化评估指标中表现较好,为故障诊断算法提供了丰富且高质量的数据支撑。

(3) 故障诊断模型的设计研究。本文选取 ConvNeXt 模型作为故障诊断的基础框架,并在此基础上引入非对称卷积模块和混合空间与通道注意力的 EMA 注意力模块,构建了改进的 ConvNeXt-EMA-ACB 模型。实验验证表明,该模型在故障诊断任务中达到了 95.36%的准确率和 95.02%的 F1 值,相较原模型提高了 3.7%和 3.32%。此外,通过引入西储大学轴承故障数据集进行迁移学习,模型表现出 95.81%的准确率,高出不迁移模型 0.22%,充分证明了基于数字孪生模型的故障特征生成与诊断方法的可行性和有效性。

(4) 故障诊断系统的设计与实现。基于上述故障诊断模型,本文设计并实现了一个功能完善的故障诊断系统。前端采用 Bootstrap 框架,后端则通过 Django 框架实现,系统涵盖了用户登录与注册、用户信息管理、数据统计、故障诊断等重点功能,以实现为用户提供可靠的服务体验。并且,采用系统测试的方法测验功能的可靠和可用,保证系统稳定。

关键词: 故障诊断; 数字孪生; 生成对抗网络; 深度学习

Abstract

In recent years, the vigorous development of new-generation information technology has significantly accelerated the intelligent transformation within the manufacturing industry. Against this backdrop, the "Made in China 2025" strategy explicitly highlights the importance of deepening the application of information technology across all aspects of the manufacturing sector. Among the various initiatives, integrating equipment fault diagnosis technology with computer technology has emerged as an inevitable trend. However, a major challenge in the field of fault diagnosis lies in the difficulty of data acquisition. Given the precision, specialization and high value of production equipment, using "destructive" methods to obtain data is unfeasible. Therefore, it is extremely urgent to explore a cost-effective method for data acquisition. Currently, the combination of digital twin technology and artificial intelligence algorithms for fault diagnosis has become a research focus in the industry. This article analyzes the existing fault diagnosis methods, conducts an in-depth study on digital twin and deep learning technologies, and applies these to drip irrigation equipment manufacturing enterprises. Ultimately, a fault diagnosis system based on a diagnosis model is successfully developed. The main research contents cover the following aspects:

(1) Twin model construction and data acquisition strategy. In response to the problem of scarce fault data in drip irrigation equipment manufacturing enterprises, this article employs digital twin technology and focuses on the key component of the driven system in drip irrigation equipment production line - bearings. Through an analysis of common bearing faults, the pitting corrosion fault of bearings is selected as the research starting point. Ls-dyna software is utilized to construct twin models and fault-injection technologies are adopted to simulate fault occurrences. By driving the model to operate and collect fault data, the problem of data acquisition is effectively resolved.

(2) Innovative research on data augmentation models. Although twin models can solve the data-acquisition problem, the obtained data still falls into the category of small samples and is difficult to support sufficient training of deep learning models. Therefore, this article proposes a generative adversarial network model that integrates a convolutional attention module and self-attention module, with the aim of enhancing the quality of the generated data. The experimental results show that the FID scores for the generated data on three types of faults reach 41.989, 64.966, and 46.273. And the generated data enable the diagnostic model to achieve an accuracy of 91.66%, and perform well in the t-SNE visualization evaluation indicators, providing rich and high-quality data support for fault diagnosis algorithms.

(3) Optimization research on fault diagnosis model. This article selects the ConvNeXt model as the fundamental framework for fault diagnosis. An asymmetric convolution module and an EMA attention module that combines spatial and channel attention are introduced based on this framework to construct an improved ConvNeXt EMA-ACB model. Experimental verification shows that the model achieves an

accuracy of 95.36% and an F1 score of 95.02% in fault diagnosis tasks, which are 3.7% and 3.32% higher than the original model, respectively. In addition, by incorporating the bearing fault dataset from Western Reserve University for transfer learning, the model demonstrates an accuracy of 95.81%, exceeding that of the non-transfer model by 0.22%. This fully validates the feasibility and effectiveness of the fault feature generation and diagnosis method based on the digital twin model.

(4) Design and implementation of a fault diagnosis system based on diagnostic models. Based on the aforementioned fault diagnosis model, this article designs and implements a fully functional fault diagnosis system. The front-end is developed using the Bootstrap framework, and the back-end functionality is realized through the Django framework. The system encompasses core functions such as user login and registration, user information management, data statistics, and fault diagnosis, providing users with a more convenient and user-friendly service experience. Meanwhile, system testing methods are adopted to verify the reliability and availability of the functions, ensuring the stability of the system.

Key words: Fault diagnosis; Digital twin; Generate adversarial networks; Deep learning;

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 数字孪生现状.....	2
1.2.2 故障诊断研究现状.....	4
1.3 研究内容.....	7
1.4 技术路线.....	8
1.5 论文组织架构.....	9
第 2 章 相关技术与理论的介绍.....	10
2.1 数字孪生技术和实验方案.....	10
2.1.1 确定建模对象.....	10
2.1.2 故障种类分析.....	11
2.1.3 建模工具选择.....	12
2.1.4 孪生模型构建.....	13
2.1.5 故障注入和数据获取.....	14
2.2 深度学习相关技术.....	15
2.2.1 生成对抗网络概述.....	15
2.2.2 注意力机制.....	17
2.2.3 ConvNeXt 模型.....	18
2.2.4 深度学习框架.....	20
2.3 迁移学习.....	20
2.4 本章小结.....	21
第 3 章 故障数据生成和数据扩充方法研究.....	22
3.1 孪生模型构建.....	22
3.1.1 模型构建.....	22
3.1.2 模型验证.....	23
3.1.3 故障注入和数据采集.....	24
3.2 数据预处理.....	26
3.3 基于生成对抗网络的数据扩充模型设计.....	26

3.3.1 基于卷积的注意力模块.....	27
3.3.2 生成器模型.....	28
3.3.3 判别器模型.....	29
3.4 实验设计和结果分析.....	30
3.4.1 实验设计.....	30
3.4.2 结果分析.....	31
3.5 本章小结.....	36
第 4 章 基于 CONVNEXT 的故障诊断模型的研究.....	37
4.1 数据准备.....	37
4.1.1 孪生故障扩充数据集.....	37
4.1.2 西储大学轴承故障数据集.....	37
4.2 故障诊断模型设计.....	38
4.2.1 模型整体结构设计.....	39
4.2.2 基于多分支结构的 Stem 模块.....	40
4.2.3 非对称卷积模块.....	41
4.2.4 EMA 注意力模块.....	43
4.3 实验设置和结果分析.....	45
4.3.1 实验设置.....	45
4.3.2 实验结果分析.....	46
4.4 基于迁移学习的诊断方法验证.....	48
4.4.1 实验设置.....	48
4.4.2 实验结果分析.....	49
4.5 本章小结.....	51
第 5 章 故障诊断系统的设计与实现.....	52
5.1 需求分析.....	52
5.1.1 功能性需求.....	52
5.1.2 非功能性需求.....	53
5.2 系统设计.....	54
5.3 系统实现.....	55
5.3.1 系统开发工具与环境.....	55
5.3.2 数据库设计.....	55
5.3.3 系统登录模块.....	57
5.3.4 故障诊断模块.....	57
5.3.5 用户管理模块.....	58

5.3.6 数据统计模块.....	59
5.4 系统测试.....	60
5.5 本章小结.....	61
第 6 章 结论与展望.....	62
6.1 结论.....	62
6.2 展望.....	63
参考文献.....	64
致谢.....	69
作者简介.....	70

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

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，在例如制造业、智慧城市、医疗服务等领域创造了巨大的价值，而随着新一代信息技术和制造业的深度融合和发展，制造业的生产方式也因为信息技术的革新产生着巨大的变革。先进制造业的发展正处于重要的战略机遇期，全球各大制造强国均提出了有关制造业升级的计划，例如德国的“工业 4.0”，美国提出的“先进制造业国家战略计划”，英国的“工业 2050 战略”等等，力求通过信息技术等新兴技术实现工业化的再次发展。尽管不同国家提出的战略背景不同，但是其均希望实现制造业和信息技术的融合发展，从而实现驱动整个行业的智能化、数字化和信息化。与此同时，中国作为制造业大国，随着新兴技术的不断发展，正推动着“中国制造”向着“中国智造”发展，致力于实现“中国创造”。我国在 2015 年出台了“中国制造 2025”作为推动国家向制造业强国发展的总体纲领，其中明确把“推动工业化和信息化深度融合”作为中国制造 2025 战略的九大任务之一，“明确指出要加快智能制造装备和产品的生产线研发，促进工艺的仿真优化，深化信息技术在制造业的应用等”，为我国制造业发展提供了指导。

为了实现传统制造业向着智能制造的转型升级，学术界和工业界开展了广泛深入的研究，围绕着物联网、云计算、人工智能、区块链等新兴技术展开了大量的研究工作。随着研究的不断深入，研究人员逐渐把研究重点转到了数字孪生（digital twin）上。数字孪生是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分析、了解和优化。数字孪生综合了物联网技术、建模仿真等信息技术。因其特有的技术特点，学术界和工业界认为数字孪生可以有效解决制造业向智能化发展的难题，并已将该技术应用到实际工业生产中、验证了其可行性：德国的“工业 4.0”已经把数字孪生作为重要的组成部分，权威 IT 研究和顾问公司 Gartner 也开始认识到了数字孪生的重要性，开始把该技术作为重要的科技发展趋势加以报道。同时中国科学技术协会也开始重视相关技术的发展，并将其作为前沿科学技术问题研究，国内一批高校的相关研究项目也纷纷上马，有关数字孪生的研究处于热潮。其中，探索数字孪生技术在设备故障诊断中的应用受到了广泛关注。

作为我国滴灌技术推广最早、应用最广的地区，新疆地区的滴灌技术已经处于领先地位，极大地带动了我国农业科技和节水技术的发展。作为滴灌设备生产企业，其重要性深度嵌入了新疆地区在发展节水农业、推动农业产业升级等的各个环节。面对当前工业生产智能化的发展趋势，传统滴灌设备制造企业也处在产业升级的关键时期，技术革新的各个环节也面临诸多挑战。其中，作为生产的关键一环，滴灌设备生产企业在故障检测方面存在明显不足。对设备关键零部件的故障检测问题上，仍主要依赖于日产维护和设备损坏后的人工维修。而这一过程从故障类型的确认、维修方案的制定到实际维修的实施，不仅耗时费力，也和故障诊断所追求的快速、实时响应要求大相径庭。

因此，结合制造业信息化、智能化的发展需求，将深度学习应用于传统滴灌设备制造企业的故障诊断环节，将有力推动该类企业从传统的人工维修模式向智能维修模式的转型。然而，深度学习模型的训练离不开充足且多样化的数据支持，针对当前该类企业面临的故障数据匮乏、难以采集的实际问题，本研究尝试利用数字孪生技术进行虚拟建模，通过仿真生成故障数据样本，为深度学习模型的训练提供丰富而全面的数据资源。这一方法将显著提升企业的故障诊断能力，使高层管理人员能够迅速掌握车间的运行状态，同时辅助技术人员进行故障维修和日常的保养维护工作。综上所述，将深度学习与数字孪生相结合，对于推动传统滴灌企业实现生产过程优化、降低成本、提升产品质量等方面具有重要意义，是该类企业迈向智能制造、实现可持续发展的关键一步。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 数字孪生现状

数字孪生作为一种普适性的技术，可以在不同的领域进行应用，例如产品设计、工业制造、现代医疗、智慧城市等。数字孪生主要被应用在制造业上，其概念也在这个过程中不断发展。数字孪生最初是一种实现产品的全生命周期管理(PLM)的概念和方法，Michael Grieves 博士针对应用的需求给出了三层架构，即物理实体、虚拟实体和数据流。NASA 首先接受并且把数字孪生^[1]应用到了“阿波罗计划”并取得效果，此后，美国空军研究实验室首次提出了对飞机机身实现数字孪生的构想，以实现对机身状态的有效掌握；2012年，美国国家航空航天局将数字孪生作为保证飞行器健康管理的关键技术，并着重加快研究和发 展，使数字孪生受到了全世界的关注。世界主要的制造业强国均开始对该技术进行深入的探索。

国外针对数字孪生的研究开展较早，并且做出了一些值得借鉴的有价值的工作，这些工作的重点集中在界定数字孪生的概念和实现方法上。Sharma 等^[2]从数字孪生的实现

技术入手，重点阐述了数字孪生的发展是基于多领域的技术发展，同时说明了针对不同的领域数字孪生的使用会存在一定的差异，阐述了数字孪生需要一个统一的标准和评价体系，以促进数字孪生的不断发展。Rasheed 等^[3]从数字孪生的实现细节和技术进行切入，重点讲述了数字孪生的价值、挑战、解决挑战的关键技术、相关受益人等等。同时认为数字孪生应该建立一个统一的、标准化的框架。Schleich 等^[4]在参考三层架构的基础上，提出了基于 skin model shapes 概念的综合模型。该模型是物理产品在设计和制造中的数字孪生，实现了产品生命周期的概念化表示。Fuller 等^[5]对数字孪生的前置技术，例如物联网、人工智能等技术进行综述，同时讲解了数字孪生技术的整体架构，给出了其在制造业、医疗领域和智慧城市方向的应用和研究前景。Melesse 等^[6]定义了数字孪生是物理产品、资产、流程、系统或服务的虚拟表示，以方便使用者理解、预测和优化物理产品的性能，确定其在工业运营中的价值，重点强调在生产、预测性维护和售后服务领域使用数字孪生。

在讨论数字孪生的概念的基础上，许多学者也开始在各个领域进行相关实践。比如，Lee 等^[7]在 5G-CPS（物理信息系统）的基础上融合大数据分析和深度学习，构建得到了一个支持多种功能的制造业智能框架。整个框架分为了智能传感器、数据传输、大数据分析、虚拟模块和服务等模块，实现了智能化车间的构造，以促进传统制造业向智能制造和工业 4.0 的转型。Hodavand 等^[8]聚焦于供暖、通风和空调（HVAC）系统。利用数字孪生技术为设施管理提供了可持续的解决方案。Johansen 等^[9]将数字孪生的研究重点放到对船舶的航动系统的状态监测上，通过刻画船舶动力系统的孪生模型，实现了降低成本和提升效率的作用。总之，数字孪生的应用从原始的航天领域拓展到了包含建筑、船舶、制造业等多个领域，首先在国外掀起了一阵研究热潮。

国内针对数字孪生的研究相对落后，2015 年我国出台“中国制造 2025”后，提出了要从“中国制造”向“中国创造”发展，数字孪生引起专家学者们的关注。在众多学者中，北航团队的陶飞博士创造性地提出了数字孪生五维模型^[10]，定义了包括物理实体、孪生模型、相关服务、虚实数据、链接在内的五维模型，该模型在国内外受到广泛的认可，被认为是数字孪生的标准模型。此外，陶飞博士在文献^[11]概述了数字孪生在整个产品生命周期中的应用方向，并且认为可以在车间调度和控制管理方向加强应用。在文献^[12]中针对数字孪生研究存在的问题，提出了数字孪生的成熟度模型，将数字孪生的成熟度分为了以虚仿实（L0）、以虚映实（L1）、以虚控实（L2）、以虚预实（L3）、以虚优实（L4）和虚实共生（L5）六个等级，清晰界定了数字孪生的包含范围和优化路径。文献^[13]针对数字孪生目前正经历着从概念和理论研究阶段到实施和应用阶段的重大转变，提出需要建立一个数字孪生研发平台。在对数字孪生理论和关键技术进行系统研究的基础上，提出并设计了数字孪生软件平台参考体系结构 make twin 以及它的十大核心功能，并验证了所提出的参考体系结构。陶飞博士的研究重点是制定相关的数字孪生标

准，而其他学者则是在包括制造业、交通、建筑业等多领域开展了有关数字孪生的实践工作：Sun 等^[14]提出了一种新的建模方式，结合深度学习的 LSTM 网络架构，基于制造业车间生产线的状态预测和健康管理（PHM），利用数字孪生数据时间粒度的不同，分别构建了短期数字孪生模型和长期数字孪生模型实现设备的检测和维护。Liu 等^[15]分析了制造过程的不同阶段的应用，包括设计阶段、生产阶段、服务阶段、退休阶段，针对每个阶段给出了数字孪生的相关应用。何^[16]将虚拟建模、过程监测、故障诊断和优化控制等技术结合起来，提出了一个基于数据驱动的数字孪生系统以实现设备的自动化流程控制。通过在 Tennessee Eastman 基准过程中进行不同的仿真，评估了所提出的数字孪生系统的有效性和性能。Zhang 等^[17]研究了铁路点机用于铁路点机的开关、锁紧和监控，提出了一种用于 RPM 数字双辅助故障诊断的扩展框架，支持实现铁路点机故障准确、实时的监测与诊断。Xie^[18]使用数字孪生概念勾勒出智能建筑领域的发展，通过探索带符号的时间序列的符号表示来识别建筑特有故障的信息感官维度。

截至目前，众多学者在多个领域探索了有关数字孪生的标准和方法，并在不同的领域开展了相关实践，有关数字孪生的研究处于快速发展期。

1.2.2 故障诊断研究现状

故障诊断的主要流程包括收集待诊断设备的运行数据、数据特征提取和设备状态分析等步骤，通过数据的收集来深入地分析设备的健康状态，评估设备的磨损情况，从而有针对性地制定维修保养计划，保证设备可以稳定、正常、高效地运转。故障诊断方法可以大致分为三类：基于模型的方法、基于知识规则的方法以及基于数据驱动的方法。这些方法为制造业的设备维护和管理提供了有力的支持。

（1）基于模型的方法

基于模型的方法重点在于构建数理模型，首先通过布置传感器等方式采集设备数据，之后选择合理的数学模型实现设备的模拟运转，最终分析得出设备的运行情况、判断故障种类。该技术主要包括参数估计法、状态估计法等，它们为系统的故障诊断提供了有力的工具。

Nguyen 等^[19]为了降低工业的运行和维护成本，采用基于物理模型的液压系统的系统级诊断方法，通过直接构建物理模型的方法提供改进的故障诊断能力。并且以高压给水系统故障诊断为例进行了实例分析，验证了该方法的有效性。柳宇翀^[20]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，通过直接构建系统模型的方法，实现了故障的高准确度诊断。

基于建模的方法要求研究人员对相关的设备故障有较为清晰和深刻的理解，对研究人员的数学和物理能力要求较高，这对于研究人员来说是一个巨大的挑战。另一个挑战

则是建立一个高保真、对外界环境进行反馈的数理模型较为困难。因此该方法的应用局限性较大。

(2) 基于知识规则的方法

在信息化和数字化技术广泛渗透制造业之前,众多企业主要依赖人工方法进行设备的故障诊断。检修员通过定时检查或实地考察故障现场,采集设备的状态信息,通过长期的维修工作,检修员可以积累大量的设备故障相关知识。通过对此类知识的积累、整理和存储从而形成了相关知识库,该知识库可以对设备的故障进行判断、并给出维修意见和指导,相关的方法包括有向图、专家系统等方法。

Lin 等^[21]提出了一个故障诊断知识库框架来解决知识库更新问题。首先,利用所提出的半监督多空间流形聚类方法设计动态聚类模型来识别属性聚类并聚合新类型,之后通过生成对抗网络算法建立知识进化模型,实现知识库的自学习和自优化能力。最后,为了验证提出的方法的有效性,选择在轴承数据集上开展对比实验,结果证明该方法不仅可以更新知识库,还可以为设计具有自我优化和自我学习能力的自主知识库提供一种可行的方法。曹雨燕^[22]针对制造车间备料不规范、人机协同效率低的问题,利用知识图谱对专业的故障诊断知识实现抽取和存储,以便在遇到设备故障时可以快速解决问题,提高设备的生产效率。

基于知识规则的方法相较于建模法,在很大程度上减轻了建模领域的难度,转而专注于运用专业知识进行设备检测,取得了相当不错的效果。然而,这种方法的高度有效性在很大程度上依赖于知识库的构建质量。知识库的质量不高会直接导致该方法的效果下降。而受业内竞争等因素的影响,专家知识的收集往往存在一定问题,构建一个涵盖面广、知识质量高的知识库十分困难。

(3) 基于数据驱动的方法

基于数据驱动的方法则是利用设备运行过程中产生的大量数据,从数据中挖掘和设备故障有关的信息,从而实现对故障的检测。随着信息技术的发展,计算机的性能有了大幅度提升,物联网技术使得数据的实时传输成为可能,企业有能力使用信息技术实现数据的挖掘,从而减少人力成本,提高设备故障诊断的精度。数据分析的过程主要以人工智能的方法开展。

使用人工智能的方法解决设备故障检测在工业 4.0 革命中具有重要意义。国内外众多学者做了许多有探索的工作。Jieyang 等^[23]针对机械故障预测与健康管理的这一设备生命周期管理的重要阶段,结合数据驱动背景,从工业大数据的角度给出了一个全面的概述,详细介绍了数据驱动方法在故障诊断和早期预警方面的努力。Singh 等^[24]综述了基于人工智能的故障诊断技术在各种工业机械中的应用,并对近二十年发表的重要文献进行了回顾和补充,肯定了使用人工智能实现故障检测的可行性和优越性。而作为人工智能的两大重要分支,机器学习和深度学习在故障诊断中均广泛应用。

机器学习基于特征工程,在对数据提炼和清洗的基础上实现分类和预测,相关的研究较多:Shang等^[25]以卫星系统不断增加的功能密度和复杂性,苛刻的空间飞行环境为基础,结合机器学习方法开发新的故障诊断和健康监测方法(FD-HM)。Polenghi等^[26]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,了解机器人的正常运行轨迹,同时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。Gaikwad等^[27]通过在机器学习框架中使用增材制造(AM)工艺对制造的零件的缺陷进行检测,证明了机器学习结合传感器数据的故障检测方法效果较好。Darvishi等^[28]针对传感器可能出现故障导致数据失真,提出了一种基于机器学习的实时检测结构,并在硬故障和软故障下验证所提出的故障检测结构的性能。

总的来说,机器学习的模型和参数相较深度学习来说较少,更容易训练且往往在小数据集上效果明显。但是随着数据规模的不断庞大,利用深度学习实现故障诊断成为了现在较为普遍的做法。

深度学习则依赖于表示学习,通过构建多层神经网络自动提取特征实现分类和预测,相关研究应用较为广泛:Gryllias等^[29]针对缺乏足够训练数据训练诊断模型的问题,提出了一种可转移卷积神经网络以解决问题,其基于大型源任务数据集构建和预训练网络,并利用迁移学习策略实现应用。Li等^[30]提出深度对抗迁移学习网络(DATLN),用于检测机器运行中的新故障。其通过一维卷积神经网络提取特征,训练多标签分类器识别已知故障,并通过构建决策边界检测新故障。Hosamo等^[31]针对稳定的空气处理设备的运行提出了一种基于数字孪生的维修架构,并使用深度学习实现了预测诊断和维修。Qian等^[32]提出了一种改进的联合分布适应(IJDA)方法,用于旋转机械在可变工况下的鲁棒故障诊断。通过同时对齐边缘分布和条件分布,结合数据增强和稀疏过滤技术提取和共享主特征,有效提升了诊断精度。Tong等^[33]针对故障样本数量不平衡的问题,设计一种具备频谱归一化辅助分类器的生成对抗网络(ACGAN-SN),实现了数据的扩充和故障诊断的性能提升。马兴瑞^[34]针对轴承故障问题确定了数字孪生结合深度学习的方法,并进一步搭建了基于SE-ResNeXt^[35]的故障诊断算法,使用数据验证了该算法的准确率。Liu等^[36]针对制造业加工车间刀具磨损问题,从DenseNet中结合异构非对称卷积核提取单个序列和多维序列的局部特征,同时采用非对称一维和二维卷积提取多维信号的特征,实现对刀具的磨损故障预测,提高生产质量和生产效率。YANG等^[37]采用迁移学习的方法,克服故障数据缺少的问题,构建了高精度的诊断模型。胡泽^[38]提出希尔伯特-黄变换与BP神经网络结合进行训练,从而实现故障分类。

通过对数字孪生和故障诊断的国内外研究现状进行分析和总结,可以得出结论:

(1)随着计算机技术和通信传输技术的重大突破,使得大量数据计算变得廉价,相关业界可以负担大量数据的计算代价,数字孪生技术也已经从航空领域向着制造业、建