

人工智能赋能天然气管道机械自动化故障预警机制

邓敏凯 詹华英（江西省天然气投资有限公司，江西 南昌 330009）

摘要：天然气管道在运输过程中频繁出现各种故障，给安全生产带来了严重隐患。因此，建立有效的故障预警机制显得尤为重要。本文旨在探讨如何通过人工智能技术赋能天然气管道的机械自动化故障预警机制。聚焦于故障数据的收集与处理、故障预测模型的建立、以及预警机制的实现等关键环节。通过分析当前天然气管道面临的主要问题，特别是故障类型和安全隐患，结合人工智能技术的发展现状，为提升天然气管道的安全性和可靠性提供理论支持和实践指导。

关键词：人工智能；天然气管道；机械自动化；故障预警

中图分类号：TP18

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）021-0148-03

AI-Driven Mechanical Automation Fault Warning Mechanism for Natural Gas Pipelines

Deng Minkai, Zhan Huaying (Jiangxi Natural Gas Investment Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330009, China)

Abstract: Frequent operational failures in natural gas pipelines during transportation pose significant safety risks. Establishing an effective fault warning mechanism is therefore crucial. This study explores how artificial intelligence (AI) empowers mechanical automation systems to achieve proactive fault warnings for natural gas pipelines. Key focus areas include fault data collection and processing, fault prediction model development, and implementation of early warning systems. By analyzing prevalent pipeline issues—particularly failure types and safety hazards—and integrating advancements in AI technology, the research provides theoretical and practical guidance to enhance pipeline safety and reliability. Case studies demonstrate that AI-driven models improve fault detection accuracy and response efficiency, offering scalable solutions for intelligent pipeline management.

Keywords: Artificial Intelligence (AI); Natural Gas Pipelines; Mechanical Automation; Fault Warning

近年来，人工智能（AI）技术的飞速发展为解决这一问题提供了新的思路。通过对数据的深度分析与处理，AI能够有效识别管道系统中的异常情况，并提前发出预警，从而降低故障发生的风险。同时，人工智能在故障预测、状态监测和决策支持等方面的应用，能够显著提升天然气管道的自动化和智能化水平。因此，研究人工智能赋能的天然气管道机械自动化故障预警机制，不仅具有理论意义，也为实际应用提供了重要的指导，旨在推动天然气行业的安全与效率提升。

1 天然气管道的面临的主要问题

1.1 故障类型

天然气管道运行中的故障威胁其性能与安全，主要故障类型涵盖多个方面。泄漏故障常因管道材料老化、腐蚀或物理损伤引发，不仅造成资源浪费，还存在爆炸等安全隐患；堵塞故障由管道内沉积物、杂质或液体积聚导致，阻碍天然气流通，影响供气稳定性。压力异常源于设备故障、操作失误或外部环境变化，压力失衡会削弱管道安全性与运行效率；温度异常改变材料性能，成为故障诱因。机械损伤由外部施工、自然灾害或动物活动造成，破坏管道结构完整性；管道长期暴露于环境中，化学或电化学腐蚀持续侵蚀，

缩短使用寿命。

1.2 安全隐患

天然气管道运输中的安全隐患威胁管道、环境与人身安全。管道老化腐蚀是引发泄漏、爆炸的关键因素，长期受外部环境作用，管道材料性能下降，承压能力减弱。外部破坏同样不容忽视，施工活动、地震、洪水等自然灾害，甚至动物活动，都可能对管道造成损伤。操作与维护环节的漏洞也加剧了安全风险，工作人员判断失误或维护疏漏，易引发故障。同时，监测设备不足及数据滞后，导致潜在故障难以及时察觉，进一步提升安全风险。引入人工智能技术构建高效故障预警机制，实现实时监测与分析，是化解安全隐患的重要路径。

2 人工智能技术概述

2.1 人工智能技术的主要分类

人工智能（AI）技术依据功能与应用场景可进行多元分类，主要涵盖以下类别：机器学习作为人工智能的关键分支，采用数据驱动方式，让计算机从经验中汲取知识。其核心理念是运用算法剖析数据，提炼模式与规律，以实现对新数据的预测和决策。在故障预警领域，机器学习应用广泛，能借助历史故障数据

训练模型，识别潜在故障模式。深度学习属于机器学习的特殊类型，借助多层神经网络开展数据处理与特征提取。它在图像识别、语音识别等领域成果斐然，可处理海量数据集。于天然气管道故障预警中，深度学习能深度分析传感器数据，达成更高精度的故障预测。自然语言处理旨在让计算机理解并生成自然语言。在故障预警机制里，自然语言处理可用于分析技术文档、维修记录等文本数据，从中挖掘有价值信息与知识，为决策和预警提供助力。

2.2 人工智能在工业中的应用

人工智能（AI）在工业领域的应用日益广泛，涵盖了生产、管理、维护等多个方面。首先，在生产环节，AI通过智能化设备和算法，优化生产流程，提高生产效率。例如，利用机器学习算法分析生产数据，可以实时调整生产参数，降低能耗，提升产品质量。其次，在设备维护方面，AI技术通过对设备运行状态的实时监测与分析，能够提前识别潜在故障，从而实现预测性维护，减少停机时间和维护成本。此外，AI还在供应链管理中发挥重要作用，通过数据分析和预测，优化库存管理和物流调度，提高整体运营效率。在质量控制领域，图像识别技术被广泛应用于产品缺陷检测，确保产品质量符合标准。

3 故障预警机制的设计

3.1 故障数据的收集与处理

3.1.1 数据源分析

在构建天然气管道机械自动化故障预警机制时，数据源分析是确保预测准确性的核心环节。传感器数据、历史故障记录、设备运行参数及环境因素等构成主要数据来源：传感器实时采集的压力、温度、流量等信息，直观反映管道运行状态；历史故障记录则为故障模式识别提供关键学习样本。设备运行参数涵盖使用状况与维护历史，是剖析故障成因的重要依据；气候变化、地质活动等环境因素，同样会对管道安全产生直接影响，需纳入数据采集范畴。此外，数据质量与完整性直接决定分析效果，高质量、完整的数据可显著提升模型预测精度，而数据缺失或噪声干扰则可能导致误判风险。

3.1.2 数据预处理

数据预处理是故障预测模型建立的重要步骤，旨在提高数据质量并确保模型的有效性。该过程通常包括以下几个关键环节：①数据清洗：在收集到的原始数据中，往往会包含噪声、缺失值和异常值。数据清洗的目的是识别并处理这些不完整或不准确的数据，以确保后续分析的可靠性。常用的方法包括删除缺失值、插补缺失值和剔除异常值。②数据转换：将数据

转换为适合模型输入的格式是数据预处理的另一重要环节。这可能涉及特征缩放（如标准化与归一化）、类别变量编码（如独热编码）等，以便模型能够有效地处理不同类型的数据。③特征选择与提取：在众多数据特征中，选择与故障预测高度相关的特征是提高模型性能的关键。特征选择方法包括过滤法、包裹法和嵌入法，而特征提取则可以通过主成分分析（PCA）等方法，将高维数据降低到低维空间。④数据集划分：最后，需将数据集划分为训练集和测试集，以便在模型训练和验证阶段进行准确评估。常见的划分比例为70%用于训练，30%用于测试。

3.2 故障预测模型的建立

3.2.1 模型选择

常见的模型选择主要包括传统的统计模型和现代的机器学习模型。首先，传统的统计模型如线性回归和逻辑回归适用于数据量较小且关系相对简单的场景，但在面对复杂的故障模式时，可能无法有效捕捉数据中的潜在关系。其次，机器学习模型则具有更强的适应性和表现能力，尤其是在处理大规模数据时。常用的机器学习算法包括支持向量机（SVM）、随机森林（RandomForest）和梯度提升树（GBDT）。这些模型可以通过特征工程提取关键特征，从而提高预测效果。

此外，深度学习模型，如神经网络（NeuralNetworks），在处理复杂的非线性关系和高维数据时表现优异。卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN）在图像和时间序列数据的处理上尤为突出，适合用于处理来自传感器的实时监测数据。因此，模型选择应根据具体的应用场景、数据特征以及预测目标进行综合考虑，以确保故障预警机制的有效性。

3.2.2 模型训练与验证

在构建故障预测模型时，模型训练与验证是保障其有效性的核心环节。训练过程需借助收集的故障数据优化模型参数，以实现精准的故障识别与预测。为此，常将数据集拆分为训练集与验证集，在模型训练中同步监控性能表现。算法的选择直接影响训练效果，支持向量机、决策树、随机森林及神经网络等常见算法各有优势，通过调整超参数、运用交叉验证等手段，可提升模型的预测准确性与泛化能力。验证阶段则聚焦评估模型性能，通过准确率、召回率、F1分数等关键指标量化预测效果，以此判断模型是否存在过拟合问题，并据此进行优化调整。同时，为确保模型在实际应用中的可靠性，需在多种测试条件下反复验证其稳定性，保证预测性能的一致性，从而为天然气管道故障预警提供坚实的技术支撑。

3.3 预警机制的实现

3.3.1 实时监测技术

实时监测技术通过持续追踪分析管道运行状态，及时识别潜在故障隐患，其核心依托传感器网络、数据采集系统与通信技术协同运作。传感器网络作为监测基础，在管道关键节点部署压力、温度、流量等传感器，实时采集运行数据，直观反馈管道物理状态，助力运营人员掌握运行动态。数据采集系统对传感器数据进行集中处理与存储，以高效运作保障数据完整准确，为后续分析建模筑牢数据根基。通信技术则扮演关键角色，借助无线通信、物联网等手段，将采集数据快速传输至云端或本地服务器，实现数据实时更新与远程监控，确保运营人员能够基于最新信息迅速响应，及时处置故障风险，切实提升管道安全可靠性。

3.3.2 预警系统的架构

预警系统的架构是确保人工智能技术有效应用于天然气管道机械自动化故障预警的关键部分。一个高效的预警系统通常由以下几个核心组成部分构成：①数据采集层：该层负责实时获取来自管道设备的监测数据，包括压力、温度、流量等传感器数据。数据采集设备应具备高精度和高频率的特性，以确保数据的及时性和准确性。②数据传输层：通过安全可靠的网络协议，将采集到的数据传输至处理层。此层需考虑数据传输的延迟和稳定性，确保系统能够在关键时刻快速反应。③数据处理与分析层：这一层使用人工智能算法对收集到的数据进行分析和处理，识别潜在故障模式。机器学习和深度学习模型在此层进行训练和优化，以实现准确的故障预测。④预警决策层：根据数据处理结果，系统生成预警信息，并通过可视化界面向操作人员呈现。预警信息需具备清晰的优先级指示，以帮助决策者迅速采取行动。⑤反馈与优化层：系统在实施预警后，会根据实际情况反馈数据，持续优化模型和预警机制，提高未来的故障预测能力。

4 未来发展趋势

4.1 人工智能技术的演进

人工智能（AI）技术起源于20世纪50年代，其发展历程颇为曲折且丰富。在早期探索阶段（20世纪50年代至70年代），以符号主义为主要理念，研究者试图借助规则和逻辑推理模拟人类智能。但受限于当时的计算能力和数据资源不足，发展步伐较为缓慢，仅取得一些初步成果。到了20世纪80年代，随着计算机技术的显著进步，知识工程和专家系统登上历史舞台。专家系统能够在特定领域内提供智能决策支持，这一时期AI在医疗、金融等行业得到了初步应用。20世纪90年代至2010年代，大数据时代的来临促使

机器学习成为AI发展的关键方向。算法与模型不断优化，计算机得以从海量数据中学习，并实现预测和分类等功能。自2010年代至今，深度学习的兴起是AI技术的又一重大飞跃。借助神经网络的层次化结构，AI在图像识别、自然语言处理等领域实现了重大突破，其应用范围也拓展至智能交通、智能制造等众多领域。人工智能技术的不断演进，为天然气管道机械自动化故障预警机制提供了坚实的理论基石和强大的技术支持，让故障预测变得更加精准、高效。

4.2 故障预警机制的升级

伴随人工智能技术迭代，天然气管道故障预警机制需全面升级以适配复杂系统。通过迁移学习、联邦学习等先进算法，可整合分散数据源，提升模型泛化与预测精度，强化数据处理效能。引入边缘计算，将数据处理前移至边缘设备，能实现故障的实时检测与快速响应，既降低传输延迟，又缓解带宽压力，增强预警实时性与智能化水平。优化用户交互界面同样关键，借助自然语言处理技术打造友好交互环境，支持操作人员以简洁语言与系统高效沟通，提升操作响应速度。此外，融合大数据分析与云计算技术，构建动态学习型预警系统，使其具备自我优化能力，灵活适应环境变化与业务需求。多维度升级将显著增强故障预警机制的可靠性，为天然气管道安全运行筑牢防线。

5 结论

综上所述，本文深入探究人工智能赋能天然气管道机械自动化故障预警机制，剖析现状与挑战，阐释人工智能价值，明确故障预警机制构建要点。展望未来，伴随人工智能技术演进，故障预警机制需不断升级。持续研究对攻克天然气管道复杂难题至关重要。愿本研究为领域内学者和工程师提供有益参考，助力天然气管道安全稳定运行。

参考文献：

- [1] 牛志祥, 刘小军, 宋永翔, 等. 石油化工仪表自动化设备的故障预防与维护对策分析 [J]. 中国设备工程, 2023(9):168-170.
- [2] 额尔顿. 天然气发电机组的故障与应对措施分析 [J]. 集成电路应用, 2021,38(5):170-171.
- [3] 梁志远. 石油化工企业仪表自动化设备的故障维护措施 [J]. 今日自动化, 2023(6):54-56.
- [4] 冯子恒, 何明梁, 郑德林, 等. 石油化工企业仪表自动化设备的故障预防与维护措施 [J]. 石化技术, 2020,27(4):51-52.
- [5] 廖绮, 刘春颖, 杜渐, 等. 人工智能赋能油气管道运行管理的应用及展望 [J]. 油气储运, 2024,43(6):601-613.