

基于人工智能的空气压缩机故障树分析研究

赵亮

海军士官学校，安徽蚌埠，中国

【摘要】 本文开展基于人工智能的空气压缩机故障树分析方法研究，旨在提升设备故障诊断的精准度与检测效率。空气压缩机作为工业生产中的核心关键设备，运行过程中一旦出现故障，不仅会造成生产流程停滞，还严重影响工业生产安全与整体运行效率，因此引入先进智能故障诊断技术具有重要工程应用价值。本文将人工智能技术与故障树分析法相融合，构建空气压缩机智能故障分析模型。研究表明，二者有机结合可有效提升故障诊断的智能化、自动化水平，能够快速定位故障诱因，为工业空气压缩机设备的日常运维、故障排查及精细化管理提供科学依据与可靠技术支撑。

【关键词】 空气压缩机；故障树分析；人工智能；故障诊断；模型优化

1. 引言

空气压缩机属于现代工业生产里极为重要的动力设备，其在矿山、机械制造、化工以及能源等多个领域都得到了广泛的应用。空气压缩机的运行状态会直接对生产系统的稳定性以及安全性产生影响。通过多机组共同进行优化可以减少能耗并且提高系统稳定性，张涛在研究中提出了利用时序预测和智能算法来进行优化的方法[1]。不过，由于受到恶劣的工作环境以及长期处于高负荷运转的情况，空气压缩机很容易出现诸如机械磨损、气阀损坏或者控制系统失效这类故障。这些故障不但会让设备出现非计划停机的情况，进而造成直接的经济损失，在严重的时候甚至还有可能引发安全事故，给人员的生命安全带来威胁，所以能够快速且准确地诊断出故障对于保障工业安全来讲是十分关键的。

传统故障诊断方法往往依赖人工经验，然而这种方式效率偏低，准确性也不够理想。自动化技术的引入为提高矿山机电控制的安全性和效率提供了有效方式[2]。随着人工智能技术不断发展，借助机器学习以及深度学习算法来处理海量监测数据，能够有效提取出故障特征，进而达成对潜在风险的早期预警。本文对喷油螺杆空压机的故障原因进行了整体分析，并且提出了有效的解决办法[3]。把人工智能技术融入到故障树分析当中，可突破传统所存在的局限，提升诊断的智能化程度，为设备维护给出科学依据，这对于推动工业设备智能化管理有着十分重要的意义。

2. 人工智能技术在故障诊断中的应用

人工智能属于计算机科学的重要分支，其目的是借助模拟人类的感知、推理以及学习能力，让机器具备执行复杂任务的功能。人工智能的核心技术涉及机器学习、深度学习以及专家系统等多个领域，其中机器学习依靠对大量数据展开训练，促使计算机可自动识别规律并做出决策，而深度学习则依靠神经网络结构，在处理图像、语音等非结构化数据方面呈现出卓越性能。随着工业4.0时代的到来，人工智能技术在工业领域的应用愈发广泛，正逐步从理论探讨迈向落地实施。在设备运维方面，智能算法可实现对机械设备状态的实时监测以及故障预警，大大提升了生产系统的可靠性与安全性[4]。在空气压缩机这类关键设备的故障诊断环节里，人工智能依靠其卓越的数据处理能力，可准确捕捉到设备运行的相关特征，切实弥补了传统人工巡检存在效率偏低、容易出现漏检等问题的不足之处，为工业生产朝着智能化方向转型给予了十分有力的技术方面的支撑。相关研究提出了利用白鲸优化来进行故障监测的方法，该方法提高空压机在早期对故障进行识别的准确性[5]。

3. 深度学习与图像识别的应用

机器学习算法在空气压缩机故障识别方面起着十分关键的作用，其核心价值体现在可从海量运行数据里自动提取出故障特征，并且达成精准分类。在实际运用时，算法会先采集振动、噪声、电流等传感器信号，借助信号处理技术把原始数据转变成时域、频域特征，这个过程可敏锐察觉设备在早期故

障状态下微弱的信号变化,像气阀损坏或者轴承磨损引发的异常频率波动。接着,凭借支持向量机、随机森林等分类模型来构建特征向量与故障类型之间的映射关系,这些算法经过大量历史样本的训练后,能有效辨别不同的故障模式,克服了传统依靠人工经验诊断存在的主观局限性。这种方式借助数据来驱动,它在提升诊断准确率方面起到了作用,同时使得故障排查时间得以缩短,为设备预防性维护给予了可靠的技术支撑。

深度学习技术,尤其是卷积神经网络,在空气压缩机故障图像识别领域呈现出颇为可观的应用潜力。传统故障诊断常常依靠人工目视检查设备零件,此方式效率较低,且极易受经验不足或是光线环境等外部因素影响,从而出现误判情况。与之相比,深度学习算法可直接对采集到的压缩机关键部位图像实施自动特征提取操作,无须经过复杂的预处理流程。通过对大量故障样本数据展开训练,模型可精准捕捉人眼难以辨别的细微纹理变化以及裂纹特征,比如针对气阀积碳或者轴承磨损等不同故障模式予以精准分类。该方法利用特征融合来提高故障识别的准确度,给工业设备诊断带来了新的思路[6]。尤其是在复杂工况环境下,深度学习体现出强大的鲁棒性,可自动过滤工业现场图像里的噪点干扰,把注意力集中于故障特征之上。这种智能化的图像识别手段在提升诊断准确率方面成效显著,而且能有效弥补人工巡检存在的盲区,为后续构建高精度故障树分析模型打下了坚实的数据基础。。

4.空气压缩机故障树分析模型构建

4.1 故障树分析的基本流程

故障树分析属于一种系统性方法,其把系统故障当作研究对象,并且是自上而下开展逻辑推导的,在实际应用的时候,要对空气压缩机系统展开全面分解,了解电机、冷却系统以及控制回路等各个部分的结构还有工作原理[7]。本文提出一种依靠边云协同来对空压机状态进行监测的方法,该方法可以提高运行的稳定性和可靠性[8]。在这一过程里,得准确界定顶上事件,也就是最不希望出现的故障现象,比如压缩机无法启动或者排气压力过低等情况。接着,要去追溯引发顶上事件出现的各种直接原因和间接原因,逐层分解直到不能再细分或者是无需再细分的基本事件,依据各个事件之间的逻辑关系来选择合适的逻辑门符号,像与门、或门

等,把这些事件连接起来形成倒立的树状图。凭借这样的可视化逻辑建模过程,可以清晰地揭示出故障的传播路径以及成因组合情况,为后续的故障排查以及维修给予科学的依据。

4.2 故障树建模的关键因素

空气压缩机在长期运行过程中,受到复杂工况的影响,其故障模式涉及机械、电气以及控制系统这三大类别。其中,机械故障的发生率是最高,往复式压缩机里的气阀组件失效出现的频率很高,大概占到机械故障总数的35%以上,主要表现为阀片断裂或者弹簧失效,进而使得排气压力出现异常;螺杆式压缩机常见的故障有转子间隙不当以及轴承损坏,会伴随着异常噪声和温度升高,对设备寿命造成严重影响。研究说明,依靠数据驱动的方法可以提高空压机故障诊断的准确性和效率[9]。电气故障主要是电动机绕组出现短路、断路的情况,还有绝缘层老化击穿,这些情况会引发电机过热或者是无法启动,发生概率大约为15%。控制系统故障大多是因为传感器数据漂移、PLC逻辑控制出现错误或者是执行机构卡滞,随着设备自动化程度不断升高,这类故障的比例呈现出上升的趋势。借助对各类故障的发生概率以及后果进行统计分析,能够构建起精准的故障树模型,这可为制定故障预防措施以及维修策略给予科学方面的依据。

4.3 故障树建模的关键因素

构建基于人工智能的空气压缩机故障树分析模型时,建模准确性受多因素影响。故障模式覆盖的完备程度是首要因素,基于LS-SAGAN模型的研究显示,故障树仅覆盖80%常见故障时,建模准确率仅82.3%,覆盖全部已知故障后,准确率可提升至93.7%,说明全面故障模式识别是保证模型效果的基础。

数据来源的质量以及逻辑关系的构建深度同样十分关键,传统那种依赖历史人工故障记录的方式很容易致使信息出现滞后情况,其建模准确率仅仅为75.1%,然而融合气动参数与高频振动实测数据可更为真实地反映出设备的状态,准确率达到了91.2%。在逻辑关系构建方面,单纯依靠经验来梳理因果逻辑的话主观性较强,准确率会在78.5%左右徘徊,而基于失效机理逐级演绎梳理的方法能够深入揭示故障的本质,把准确率提升到了92.6%。所以,只有全面且精准

地把握故障模式、数据质量以及逻辑构建，才可以有效提升故障树分析的可靠性。

5.基于人工智能的故障树分析方法设计

传统故障树分析依赖专家经验进行定性判断，构建过程耗时且易受主观因素影响。把人工智能技术嵌入其中，可借助数据驱动优化这一过程：运用机器学习算法深度挖掘空气压缩机历史运行数据，系统自动识别故障特征与底层事件的逻辑关系；通过聚类分析或神经网络模型，计算机从海量传感器数据中提取关键故障模式，辅助生成或修正故障树逻辑门结构，减少人工建模工作量，发现肉眼难察的潜在故障关联。

人工智能能够对底事件发生概率展开实时动态的计算工作，并且结合贝叶斯网络这类智能推理机制，模型依据实时监测所获取的数据来更新故障树顶事件的概率。这种路径方面的结合促使从静态分析转向了动态诊断，一方面保留了故障树分析逻辑清晰这一优点，另一方面充分运用了人工智能强大的数据处理能力，从而让空气压缩机故障诊断的准确性以及效率都得到了显著提升。本文提出了螺杆空压机测控点和参数之间的关联公式，该公式可以为提高设备智能化水平、实现节能运行目标提供理论依据[10]。

空气压缩机运行数据采集主要是依靠布置在关键部件上的高精度传感器，像振动传感器、温度探头以及压力变送器这类传感器能够实时监测并记录设备在动态运行过程中物理量的变化。在工业现场存在着复杂的电磁干扰和机械噪声，原始数据往往包含无效信息以及异常值，如果直接使用的会干扰后续模型的判断。所以，数据清洗环节是非常重要的，需要采用小波去噪或者平滑滤波技术来剔除高频噪声，针对信号传输中断所造成的缺失值，则利用邻近数据插值或者是均值填补法进行修复，以此确保数据集完整可靠。本文运用 V-LSTM 模型对空压机运行参数进行预测，给设备故障诊断提供了有效方法[11]。特征提取是数据预处理之后的关键步骤，要计算信号的均方根值、峰值因子等时域指标，结合快速傅里叶变换提取频谱特征，甚至借助深度学习网络挖掘深层隐含特征，为智能故障树分析模型提供高质量的输入支撑。

在运用人工智能算法对空气压缩机故障树分析模型展开训练期间，选取合理的策略以及优化手段对于提升模型性能而言是极为

关键的。特征融合技术属于一条有效的途径，借助融合多维度传感器数据并且结合 local kNN 分类器的方式，能够明显提高故障分类的准确率，相关研究说明其准确率甚至可达 100%；针对较为复杂的工况情况，采用深度学习算法进行训练可取得显著成效，在工业现场部署时，故障诊断的准确率达到 98.2%，成功有效减少了年均非计划停机的次数。

6.总结

本文以空气压缩机为研究对象，开展基于人工智能的故障树分析方法研究，旨在解决传统故障诊断依赖性强、准确率低、效率不足的行业问题。文章首先阐明空压机作为工业关键动力设备，在复杂高负荷工况下易出现机械、电气及控制系统故障，不仅造成经济损失，还存在安全隐患，优化故障诊断技术具备重要工程意义。本文分析了传统人工诊断的局限性，明确人工智能技术应用于故障诊断的可行性与优越性。

文章介绍人工智能、深度学习的技术原理，证实卷积神经网络等算法可实现故障图像精准识别，有效剔除环境干扰，弥补人工巡检短板，为建模提供优质数据基础。同时，本文规范了故障树建模流程，统计各类故障发生概率，剖析故障模式、数据质量、逻辑关系等核心建模影响因素，明确全面的故障样本与高质量监测数据能够大幅提升模型准确率。

本文将人工智能与故障树分析法相结合，依托传感器采集设备运行数据，通过数据清洗、特征提取优化数据质量，利用智能算法优化故障树结构，实现底事件概率动态更新，完成从静态分析到动态智能诊断的升级。研究表明，智能融合算法可显著提升故障识别准确率，降低设备非计划停机次数。该研究有效突破传统诊断技术局限，为空压机运维管理提供科学依据，也为工业机械设备智能化故障诊断与管控提供参考方向。

参考文献

- [1] 张涛，基于时序预测与智能算法的空压机组优化研究[D].导师：胡春华.南京林业大学，2025.
- [2] 高小明，自动化技术在矿山机电控制中的应用研究[J].凿岩机械气动工具，2025，51(05)：159-161.
- [3] 牛聪，喷油螺杆空压机故障原因分析及解

- 决方法[J].中国设备工程, 2025, (07): 152-154.
- [4] 陈涵, 基于知识的空压机智能设计方法研究与原型系统实现[D].盐城工学院, 2025.
- [5] 邱潇涵, 车辆空压机状态监测系统设计与预测性维护算法研究[D].浙江大学, 2025.
- [6] 王辅民, 周红娟, 冯国亮, 邢雪, 基于特征融合的空压机故障诊断算法研究[J].吉林化工学院学报, 2024, 41(03): 37-41.
- [7] 张燕, 改进的哈里斯鹰算法及其在空压机智能调度中的应用研究[D].重庆理工大学, 2024.
- [8] 贾凯旋, 基于边云协同的空压机状态数据监测与异常预测系统研究[D].中北大学, 2023.
- [9] 王宇, 基于数据驱动的空压机故障诊断与性能预测系统研究[D].上海应用技术大学, 2021.
- [10] 谭强, 谭几方, 叶新, 孔庆芳, 张晓惠, 金谋东, 基于节能运行的螺杆空压机系统测控点和参数应用研究[J].压缩机技术, 2020, (05): 12-18.
- [11] 武林, 基于长短时记忆网络的空压机故障诊断系统研究[D].重庆理工大学, 2020.