

核电站关键设备故障诊断技术研究

冉小林

阳江核电有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i3.13632

[摘要] 核电站的安全平稳运营有赖于核心设备的稳定运作。换热器、通用阀门与容器作为关键装置,常见多类故障问题。换热器存在结垢、腐蚀、泄漏以及管束振动等常见问题;普遍存在的阀门故障主要包括内部泄漏、外部泄漏以及操作卡滞;容器则面临超压、腐蚀和泄漏的风险。因此为了保障核电站的可靠运行,本文提出了一套全面的故障诊断策略,涉及对温度、振动、压力、流量等物理参数的监控、无损检测手段,以及机器学习、人工智能等智能化算法的应用,确保了核能发电厂核心设施的稳定运作。

[关键词] 核电站; 关键设备; 故障诊断; 可靠性; 安全性

中图分类号: TM623 文献标识码: A

Research on fault diagnosis technology of key equipment in nuclear power plant

Xiaolin Ran

Yangjiang Nuclear Power Co., LTD.

[Abstract] The safe and stable operation of nuclear power plants depends on the stable operation of the core equipment. Heat exchanger, general valve and container as key devices, common and many types of fault problems. Scaling, corrosion, leakage and tube bundle vibration are common problems; the common valve faults include internal leakage, external leakage and operation lag; the container faces the risk of overpressure, corrosion and leakage. To this end, a comprehensive set of fault diagnosis strategy has been developed, involving the monitoring of physical parameters such as temperature, vibration, pressure and flow rate, non-destructive testing means, as well as the application of intelligent algorithms such as machine learning and artificial intelligence, to ensure the stable operation of the core facilities of nuclear power plants.

[Key words] nuclear power plant; key equipment; fault diagnosis; reliability; safety

引言

核电站作为一种高效、清洁的能源生产场所在全球能源构成中正发挥着愈发关键的作用。然而,核电站运作环节牵涉高温、高压及高辐射等极端环境,关键设施的稳定性和安全性对电站的全面运作状态至关重要,且可能对周边生态与公众福祉造成长远效应^[1]。若核心设施出现故障,不仅会引发核电站停运,导致重大经济损失,而且还可能触发极其危险的核事故。因此,深入探讨核能发电厂核心设施的故障识别策略,以迅速且精确地识别潜在故障问题,对于确保核能发电厂的安全与持续运作,具有显著的实际价值。

1 核电站关键设备介绍

1.1 换热器

1.1.1 设备概述。换热器作为核电站不可或缺的核心组件,其主要功能在于高效实现热量交换,被普遍应用于核反应堆的冷却系统、蒸汽发生器等关键部位,确保了核电站运行的安全与效率。该功能在于在不同温度的流体之间传输热量,以适应核电

站热力循环的应用需求^[2]。换热器种类繁多,其中常见的包括管壳式换热器与板式换热器等。在核能设施内,管壳式换热器凭借其结构稳固、抗高温高压的能力,广泛应用于实践。

1.1.2 工作原理。以管壳式换热器为实例,热流体沿管程流动,而冷流体则沿壳程流动。借助于热传导作用于管壁以及流体与管壁间的对流传热机制,实现了热流体向冷流体的热量传递过程。在此阶段,热流体的温度下降,而冷流体的温度上升,以此实现能量转移的目标。

1.2 通用阀门

1.2.1 设备概述。通用阀门在核能发电厂中扮演关键角色,负责调控流体的流向、压力及流量。其类别丰富多样,涵盖闸阀、截止阀、球阀、止回阀等。这些阀门在核电站的各种系统中扮演着核心角色,包括调控冷却剂流量以及分隔系统组件等。

1.2.2 工作原理。各类通用阀门的操作机制存在差异。例如闸阀借助闸板的升降动作实现流体的开关功能,球阀则是通过阀瓣的旋转来开关阀门。在阀门开启状态下,流体能够顺利流

通;反之,当阀门处于关闭状态时,则会截断流体路径,以此实现对流体的有效调控。

1.3 容器

1.3.1 设备概述。容器在核电站应用中负责存储与承载各类介质,包括但不限于核反应堆压力容器及稳压器。此类容器往往面临高温、高压及高强度辐射等严苛工作环境,对所用材料的性能及结构完整性的要求极为严格。

1.3.2 工作原理。以核反应堆压力容器为例,其作为核反应堆的关键组成部分,主要功能是封装核燃料元件,并确保核裂变过程在一个安全的密闭环境中进行。在操作期间,核燃料元件在封装容器内经历裂变过程,产生大量热能。该容器必须耐受内部的高温度、高压以及核辐射的影响,以保障反应进程的安全与持续稳定性。

2 常见故障类型

2.1 换热器常见故障

2.1.1 结垢与腐蚀。在长期运行期间,换热器内部流体可能混杂有各类杂质及腐蚀性成分,此类物质会逐步沉积于传热面上,进而导致传热效能减退。此外,腐蚀性物质与换热表面的化学作用会导致金属材料腐蚀,进而影响设备的使用寿命。

2.1.2 泄漏。鉴于换热器在高温、高压环境下及流体持续冲击下运行,其换热管与管板的连接节点及密封区域特别易发生泄漏。泄漏不仅会造成热能的损耗,还可能触发安全隐患。

2.1.3 管束振动。若换热器内流体的流速过快或分布不均,则可能导致管束产生振动现象。持续的振动可能诱发管束疲劳破坏,从而导致泄漏等问题发生。

2.2 通用阀门常见故障

2.2.1 阀门内漏。阀门内漏现象,即在阀门关闭状态下,仍存在微量流体从阀瓣与阀座间的密封界面溢出,这可能归因于密封面的磨损、腐蚀、杂质、阀门关闭力不足等情形。泄漏现象会干扰系统的流量调控与压力平衡,从而导致系统运行效能下降。

2.2.2 阀门外漏。阀门外漏是阀门组件如填料函、法兰接合面等位置发生的流体泄漏现象,可能原因有密封面存在缺陷、密封件损坏、紧固力不足等。泄漏不仅会导致介质的损耗,而且还可能对周边环境以及人员的安全造成潜在风险。

2.2.3 阀门卡涩。在阀门的开闭操作中,偶有卡涩情形发生,导致其功能失常,这可能归因于阀门内部组件的锈蚀、损耗或存在异物阻碍等情形所导致。阀门开关不畅会影响系统的平稳运作,并可能在紧急状况下妨碍流体的有效截断。

2.3 容器常见故障

2.3.1 超压。若容器内的压力超出其设计压力,则会引发超压情况。过高的压力可能源自系统压力调控失效、安全阀出现故障,或是操作过程中存在不当行为等因素,过高的压力会影响容器的结构性能,甚至可能导致爆炸事件的发生。

2.3.2 腐蚀。在长期运行中,容器也会受介质腐蚀的影响,腐蚀过程会使容器壁厚度减薄,进而削弱其强度,对容器的安全性能构成影响。

2.3.3 泄漏。容器的泄漏事件可能源自焊接接头、附件连接点或密封区域等,泄漏事件不仅可能导致介质逸散,还可能触发火灾及爆炸等重大安全事故。

3 故障诊断方法

3.1 换热器故障诊断方法

3.1.1 基于温度监测的诊断方法。(1)温差分析法。通过检测换热器进出端流体的温差,并将其与正常操作条件下的温差进行比较,若发现温度差异出现非正常波动,换热器可能存在诸如积垢或渗漏之类故障问题。例如换热器表面沉积物积累显著,会导致传热热阻增加,在入口温度和流量不变的条件下,传热量减少,导致热流体出口温度升高,冷流体出口温度降低,两端的温差扩大。(2)温度场监测法。通过红外测温等手段,实现对换热器温度场的即时监控。借助于评估温度场的分布特征,能够识别出潜在的局部过热现象或温度异常部位,进而识别管束可能存在的泄漏、阻塞等问题。

3.1.2 基于振动监测的诊断方法。(1)振动频谱分析。借助设置于换热器管束之上的振动传感器,收集振动信号,进而开展频谱分析,振动各异的故障类别将引发振动频谱展现出独特的属性。例如当管束发生振动时,其振动频谱会呈现出特定频率的峰值。(2)模态分析。模态分析是一种探讨结构动态属性的技术手段,通过开展换热器的模态分析,可以获得其固有频率及振型等相关参数。在换热器出现故障的情况下,其固有的频率与振型特征将随之改变,通过分析故障前后模态参数的差异,能够实现故障性质及具体位置的诊断。

3.1.3 无损检测方法。(1)超声检测。超声检测利用高频声波在材料中传播的特性,检测材料内部缺陷或测量材料性能。例如利用超声探伤仪能够识别换热管内有无裂纹、气泡等缺陷。(2)涡流检测。涡流检测技术适用于评估材料表层及邻近区域缺陷,针对换热器的管束部分,涡流检测技术能够高效识别表面裂纹、磨损、腐蚀等缺陷。(3)射线检测。射线检测技术能够直观呈现换热器内部部件的结构特征及潜在缺陷状态。通过解析射线底片,能够精确识别缺陷的形态、尺寸及其所在确切位置。

3.1.4 基于机器学习的诊断方法。(1)数据驱动的故障诊断模型。大规模搜集换热器在正常运行及发生故障时的数据,涵盖温度、压力、流量以及振动等指标,借助机器学习技术,包括支持向量机、神经网络等,构建基于数据驱动的故障识别模型。此模型能够依据接收到的即时数据,自主评估换热器的操作状况,并辨识可能的故障类别^[3]。(2)异常检测算法。异常检测算法是通过建模数据或学习正常模式,识别潜在风险,一旦实时监测数据出现偏离常规行为模式的情况,异常检测算法即能即时触发警报,警示潜在的设备故障可能性。

3.2 通用阀门故障诊断方法

3.2.1 基于压力和流量监测的诊断方法。(1)压力变化分析。监控阀门前后部位的压力变动状况。若阀门发生内漏现象,则阀门前后压力差将呈现缩减态势;当阀门出现卡涩问题时,观测到的压力变化曲线将体现出非正常震荡特征。借助于压力变动的

解析,能够评估阀门的运行状况。(2)流量监测与对比。通过流量计测定阀门的流量,并将其与标准流量进行比较。若发现流量出现异常情况,这可能提示阀门存在内漏、外漏或是开度调控不当等问题。

3.2.2阀门状态监测系统。(1)行程监测。通过部署位移传感器,对阀门的动作范围进行实时监控,在阀门发生卡涩或未关到位等故障时,其行程将偏离正常运行状态。(2)扭矩监测。在驱动装置中配置扭矩传感器,以监控阀门在开启及关闭阶段的扭矩动态,异常增大的扭矩可能指示阀门内部发生摩擦、卡阻或其他故障情况。

3.2.3声学检测方法。(1)声发射检测。声发射检测是一种动态无损评估手段。当阀门内部出现泄漏、在裂纹扩展等故障现象下,会生成声发射信号,借助声发射传感器捕获并解析信号,能够判定故障的具体性质及其所在位置。(2)超声波检测。借助超声波在介质中传播的特性,评估阀门密封面是否存在泄漏现象。在阀门发生内漏的情况下,泄漏点会生成超声波信号,借助超声波检测器能够识别并监测到此类信号。

3.2.4基于人工智能的诊断方法。(1)故障树分析(FTA)与贝叶斯网络结合。故障树分析是从顶端事件着手,逐步解析促成该事件的各种潜在因素的方法。贝叶斯网络能够处理不确定性信息,并借助概率推断来进行故障诊断。综合两者的应用,能够更为精确地评价阀门失效的可能性及其根源。(2)深度学习故障诊断模型。借助于深度学习技术,包括卷积神经网络与循环神经网络等,对阀门的监控数据进行训练与解析。深度学习架构能够自动生成数据特征,精确识别阀门故障模式,展现出卓越的诊断精确度。

3.3容器故障诊断方法

3.3.1压力监测与安全保护系统。(1)实时压力监测。安装压力传感器,实现对容器内部压力的即时监控,一旦压力超过设定值,安全防护机制将自动激活,实施减压操作,以预防超压事件的出现。(2)压力变化趋势分析。通过对容器内压力变动轨迹的解析,能够识别容器是否发生泄漏现象以及压力变动是否出现非正常状态。例如观察到压力呈现逐渐而稳定的衰减趋势,则这可能指示容器存在细微的泄漏现象。

3.3.2无损检测技术。(1)超声检测。超声检测技术适用于评估容器壁厚的变动以及识别内部缺陷,借助超声测厚仪,能够评估容器壁厚并识别可能的腐蚀减薄情况,而超声探伤仪则有助于探测容器内部的裂纹、气孔等潜在缺陷。(2)磁粉检测。磁

粉检测适用于识别铁磁性材料表面和近表面缺陷,针对容器的接缝及焊接区域,磁粉检测技术能够高效识别表面开口裂纹、磨削裂纹等缺陷。(3)渗透检测。渗透检测主要应用于识别非多孔性固体材料上的表层开放性缺陷,向容器表面施加含有染料或荧光剂的渗透液,缺陷区域会吸附该液体,进而显示缺陷的形态与所在位置。

3.3.3腐蚀监测技术。(1)腐蚀挂片。选取与容器材质一致的试片,置于容器内部,按预定时间间隔取出试片,量测其腐蚀后的重量损失,以此来评估容器的腐蚀状态。(2)电阻探针。通过检测金属丝电阻的变化,电阻探针得以监控腐蚀进程的速度。当金属丝遭受腐蚀时,其电阻值会相应增加,通过评估电阻的变化量即可计算得出腐蚀的速率。(3)电化学监测。通过应用电化学技术,包括但不限于线性极化电阻法与电化学阻抗谱法,监测容器的腐蚀电位与腐蚀电流,以此来评估其腐蚀状况。

3.3.4基于模型的故障诊断方法。(1)故障预测与健康管理(PHM)模型。通过对容器的运行数据、对材料特性、环境变量等进行整合评估,构建故障预估及健康监测模型。此模型具备预测容器剩余使用寿命的功能,能预先识别潜在故障,并据此规划相应的维护措施。(2)基于有限元分析的故障诊断。借助有限元分析软件,对容器在多种工况下应力与应变的分布进行了仿真模拟,将模拟结果与实际监测数据进行对比的方法,能够评估容器是否展现出结构性缺陷、形变等状况。

4 结语

关键核能设施故障检测技术是保障核电站安全运行的关键。剖析换热器等核心装备失效模式,运用多元技术识别隐匿故障,为检修提供支撑。未来,故障诊断技术将朝智能化、集成化发展,后续研究应深化复杂故障模式探究,强化多学科融合。

[参考文献]

[1]万欣.基于核电设备过程变量的故障预警与诊断技术研究[D].华北电力大学(北京),2023.

[2]魏巍,刘爱芬.智能电气设备在核电厂的应用研究[J].有色设备,2022,36(05):24-27.

[3]范福平.基于大数据的核电站典型关键设备(SPV)健康管理系统.浙江省,三门核电有限公司,2021-06-08.

作者简介:

冉小林(1985--),男,土家族,重庆市人,工程师,本科,研究方向:核电容器,过滤器,换热器,阀门设备维护。