

# 核电用安全阀的可靠性分析与智能预警系统开发

池岳福

中百阀门有限公司 323000

**【摘要】** 本论文聚焦核电用安全阀可靠性分析及智能预警系统开发。先阐述其工作原理、结构特点及在核电站的关键作用，为研究奠基。可靠性分析环节，运用故障树分析、失效模式与效应分析等多种方法，从多角度挖掘影响可靠性的因素。基于分析成果，结合传感器、数据处理技术及人工智能算法，设计开发智能预警系统，旨在提前察觉潜在故障，提升核电站运行的安全性与可靠性。研究显示，所提方法与系统高效准确，能为核电站安全稳定运行提供保障。

**【关键词】** 核电用安全阀；可靠性分析；智能预警系统；故障树分析；失效模式与效应分析

Reliability analysis of safety valve for nuclear power plant and development of intelligent early warning system

Chi Yuefu

Zhongbai Valve Co., LTD. 323000

**【Abstract】** This paper focuses on the reliability analysis of safety valves used in nuclear power plants and the development of an intelligent early warning system. It first elucidates their working principles, structural characteristics, and critical roles in nuclear power plants to lay the foundation for research. In the reliability analysis phase, various methods such as fault tree analysis and failure mode and effects analysis are employed to explore factors affecting reliability from multiple perspectives. Based on the analytical results, combined with sensor technology, data processing techniques, and artificial intelligence algorithms, an intelligent early warning system is designed and developed. The aim is to detect potential faults in advance, enhancing the safety and reliability of nuclear power plant operations. Research shows that the proposed methods and systems are efficient and accurate, providing a guarantee for the safe and stable operation of nuclear power plants.

**【Key words】** Safety valve for nuclear power plant; reliability analysis; intelligent early warning system; fault tree analysis; failure mode and effect analysis

## 一、引言

全球经济持续发展，能源需求增长，环境问题严峻，清洁能源需求凸显，核能占比日益增加。核电站安全稳定运行是核能发展关键，核电用安全阀作为其安全防护系统重要部分，对保障核电站设备和人员安全至关重要。它能严格控制系统压力，超压时自动开启释放压力，防止设备损坏及核泄漏等事故。但实际运行中，安全阀受介质腐蚀、机械磨损、操作不当等因素影响，可能出现故障。因此，对其可靠性分析并开发智能预警系统，对保障核电站安全运行意义重大。

## 二、核电用安全阀概述

### 2.1 工作原理

核电用安全阀主要基于弹簧加载式原理开展工作。在正常工作状态下，安全阀在弹簧力的作用下保持紧密关闭状态，阀瓣与阀座紧密贴合，有效阻止介质流通。当系统内的压力逐渐上升并超过弹簧预先设定的开启压力时，介质作用在阀瓣下方的力会大于弹簧力，阀瓣被顶起，安全阀开启，介质通过阀口迅速排出，系统压力随之逐渐降低。当系统压力降至弹簧设定的回座压力时，弹簧力重新将阀

瓣压回阀座，安全阀关闭，恢复到初始密封状态。这一过程确保了核电站系统压力始终在安全范围内，保障了设备和人员的安全。

### 2.2 结构特点

核电用安全阀的结构复杂且精密，由多个关键部件组成。阀体作为安全阀的主体，承担着承受系统内压力和介质冲刷的重要任务，其材质和制造工艺必须能够适应核电站特殊的工作环境。阀座与阀瓣紧密配合，形成密封副，保证关闭时的密封性，防止介质泄漏。弹簧提供关闭力，其性能直接影响安全阀的开启和回座压力，因此对弹簧的材料选择、加工工艺和性能检测都有严格要求。导向套对阀瓣的运动进行精确导向，确保阀瓣上下运动的稳定性，避免因运动偏差导致密封失效。调节圈则用于调节安全阀的排放压力和回座压力等参数，以满足不同工况下的需求。

此外，核电用安全阀在设计和制造上必须严格满足相关标准和规范，以适应核电站特殊的工作环境，如高温、高压、放射性等。在高温环境下，安全阀的材料需要具备良好的耐高温性能，防止因温度过高导致材料性能下降；在高压环境下，安全阀的结构强度必须足够，以承受系统内的巨大压力；在放射性环境下，安全阀的材料需要具备良好的抗辐射性能，防止因辐射损伤导致性能失效。

### 2.3 在核电站中的重要作用

核电用安全阀是核电站防止超压事故的最后一道坚固屏障。在核电站运行过程中,由于设备故障、操作失误或外部因素等原因,可能导致系统压力异常升高。如果没有可靠的安全阀及时释放压力,设备可能因超压而破裂,引发核泄漏等灾难性事故,对环境和人类健康造成严重危害。核泄漏事故不仅会导致放射性物质泄漏到环境中,污染土壤、水源和空气,还会对周边居民的生命健康造成长期威胁,引发癌症、遗传疾病等严重后果。

同时,安全阀的可靠运行还能保证核电站系统的稳定运行。当系统压力波动时,安全阀能够及时调节压力,减少设备因压力波动而产生的损坏,降低维修成本,提高核电站的经济效益和社会效益。稳定运行的核电站能够持续为社会提供清洁能源,减少对传统化石能源的依赖,降低温室气体排放,对环境保护和可持续发展具有重要意义。

## 三、核电用安全阀可靠性分析

### 3.1 可靠性分析方法

#### 3.1.1 故障树分析(FTA)

故障树分析是一种自上而下的演绎式故障模式分析方法,在核电用安全阀的可靠性分析中发挥着重要作用。它以安全阀的故障现象作为顶事件,通过深入分析导致顶事件发生的各种直接和间接原因,构建出清晰、准确的故障树模型。在构建故障树时,研究人员将各种故障原因逐步分解为不同层次的中间事件和底事件,并利用逻辑门(如与门、或门等)精确表示事件之间的逻辑关系。

通过对故障树的定性分析,研究人员能够找出导致安全阀故障的最小割集,即能够引起顶事件发生的最少底事件组合。这些最小割集明确了影响安全阀可靠性的关键因素,为后续的可靠性改进提供了方向。通过定量分析,研究人员可以计算出顶事件发生的概率以及各底事件的重要度,从而全面评估安全阀的整体可靠性水平。这种定量分析为核电站的安全管理提供了科学依据,有助于制定更加合理的维护计划和风险控制策略。

#### 3.1.2 失效模式与效应分析(FMEA)

失效模式与效应分析是一种自下而上的可靠性分析方法,它从安全阀的各个零部件出发,深入分析每个零部件可能出现的失效模式。例如,阀瓣密封面磨损可能导致密封性能下降,进而引发介质泄漏;弹簧疲劳断裂则可能导致安全阀无法正常开启或关闭,影响系统的安全运行。通过评估这些失效模式对安全阀功能和核电站系统的影响程度,可以确定失效模式的严重程度。同时,通过计算风险优先数(RPN),综合考虑失效模式的发生概率、严重程度和检测难度,对失效模式进行排序,确定需要重点关注和改进的对象。这有助于核电站管理人员有针对性地采取措施,提高安全阀的可靠性。

### 3.2 影响可靠性的因素

#### 3.2.1 设计因素

安全阀的设计不合理是影响其可靠性的重要因素之一。在设计过程中,材料的选择至关重要。如果材料不能满足核电站特殊环境的要求,如材料的耐腐蚀性、耐高温性不足,可能导致零部件过早损坏,进而影响安全阀的整体性能。结构设计不合理也是一个重要问题,如阀瓣与阀座的密封结构设计不佳,会影响密封性能,导致泄漏。开启和回座压力参数设计不准确,可能使安全阀无法在合适的压力下动作,无法有效保障系统安全。因此,在设计阶段必须充分考虑各种因素,确保安全阀的设计合理、可靠。

#### 3.2.2 制造因素

制造工艺水平和质量控制对安全阀的可靠性有着直接影响。在制造过程中,零部件的加工精度不达标是一个常见问题。例如,阀瓣密封面的表面粗糙度不符合要求,会降低密封性能,导致介质泄漏。焊接质量差可能导致阀体等部件出现裂纹,影响强度和密封性。装配过程中,如果零部件安装不到位,如弹簧安装预紧力不均匀,会影响安全阀的正常动作。因此,制造过程中必须严格控制质量,确保每一个零部件都符合设计要求。

#### 3.2.3 环境因素

核电站的特殊环境对安全阀的可靠性有显著影响。高温会使材料的力学性能下降,导致零部件变形、失效。例如,高温可能导致弹簧的弹性模量发生变化,影响其提供关闭力的准确性。放射性物质会对材料产生辐射损伤,降低材料的强度和韧性,增加安全阀失效的风险。湿度较大的环境可能引起零部件的腐蚀,尤其是在沿海或潮湿地区的核电站,腐蚀问题更为突出。因此,在设计和制造安全阀时,必须充分考虑环境因素,选择合适的材料和防护措施,提高安全阀的抗环境侵蚀能力。

### 3.3 可靠性评估指标

为了准确评估核电用安全阀的可靠性,需要建立合理的评估指标体系。常见的可靠性评估指标包括可靠度、平均无故障工作时间(MTBF)、失效率等。可靠度是指安全阀在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,是衡量安全阀可靠性的核心指标。平均无故障工作时间是指安全阀相邻两次故障之间的平均工作时间,它反映了安全阀的可靠性水平。失效率是指单位时间内安全阀发生故障的概率,用于描述安全阀的失效速度。通过对这些指标的计算和分析,可以全面了解安全阀的可靠性状况,为可靠性改进提供依据。例如,如果发现某型号安全阀的失效率较高,就需要深入分析原因,可能是材料问题、设计缺陷或运行维护不当等,然后采取相应的改进措施。

## 四、核电用安全阀智能预警系统开发

### 4.1 系统总体设计

核电用安全阀智能预警系统的总体设计目标是实现对安全阀运行状态的实时监测、故障诊断和预警。系统主要由传感器模块、数据采集与传输模块、数据处理与分析模块、故障诊断与预警模块以及人机交互模块组成。传感器模块负

责采集安全阀运行过程中的各项参数,如压力、温度、振动等,这些参数是判断安全阀运行状态的重要依据。数据采集与传输模块将传感器采集到的数据进行处理和传输,确保数据的准确性和及时性。数据处理与分析模块对采集到的数据进行处理和分析,提取特征信息,为故障诊断提供支持。故障诊断与预警模块根据分析结果判断安全阀是否存在故障,并及时发出预警信号。人机交互模块为操作人员提供直观的操作界面,方便操作人员查看系统运行状态和故障信息,提高工作效率。

#### 4.2 传感器选型与布置

根据核电用安全阀的工作特点和监测需求,选择合适的传感器是系统开发的关键。压力传感器用于监测系统内的压力变化,应具备高精度、高可靠性和良好的耐腐蚀性,能够在高温、高压环境下稳定工作。例如,可选择具有防爆、防辐射功能的压力传感器,确保在核电站特殊环境下准确测量系统压力。温度传感器用于测量安全阀关键部位的温度,可选择热电偶或热电阻传感器,根据具体监测需求进行选择。振动传感器用于监测安全阀运行过程中的振动情况,通过分析振动信号判断是否存在机械故障。在传感器布置方面,压力传感器应安装在靠近安全阀入口和出口的位置,以准确测量系统压力。温度传感器可安装在阀瓣、弹簧等易发热部件表面,实时监测温度变化。振动传感器则安装在阀体等部位,确保能够有效采集振动信号,为故障诊断提供数据支持。

#### 4.3 数据处理与分析技术

在数据处理与分析过程中,采用多种技术手段对采集到的数据进行处理。首先,对原始数据进行滤波处理,去除噪声干扰,提高数据质量。噪声可能来自传感器本身的误差、环境干扰等,滤波处理可以有效减少这些干扰对数据分析的影响。然后,运用信号处理技术,如傅里叶变换、小波变换等,对压力、振动等信号进行分析,提取信号的特征参数,如频率、幅值等。这些特征参数可以反映安全阀的运行状态,为故障诊断提供依据。接着,利用机器学习算法,如支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)等,建立故障诊断模型。通过对大量历史数据的学习和训练,使模型能够准确识别安全阀的不同故障模式。例如,利用神经网络对安全阀的振动信号进行分析,判断是否存在机械故障,提高故障诊断的准确性和效率。

#### 4.4 故障诊断与预警模型

基于可靠性分析结果和数据处理与分析技术,构建故障诊断与预警模型。该模型结合故障树分析和机器学习算法,当系统采集到的数据经过处理后,与预先建立的正常运行状

态模型进行对比。如果数据出现异常,模型首先根据故障树分析的逻辑关系,判断可能出现的故障原因,并结合机器学习算法的诊断结果,确定故障类型和严重程度。当检测到潜在故障或故障发生时,系统及时发出预警信号,通过声光报警、短信通知等方式提醒操作人员,并提供相应的故障处理建议,如更换零部件、调整运行参数等,确保安全阀尽快恢复正常运行。

#### 4.5 人机交互界面设计

人机交互界面是操作人员与智能预警系统进行交互的重要窗口。界面设计应遵循简洁、直观、易用的原则,以图形、图表等形式实时显示安全阀的运行状态参数、故障诊断结果和预警信息。例如,通过曲线图显示压力、温度等参数的变化趋势,通过柱状图显示故障发生的概率和严重程度。操作人员可以通过界面设置系统参数、查询历史数据和故障记录,方便对安全阀进行管理和维护。同时,界面还应具备权限管理功能,确保只有授权人员才能进行相关操作,保障系统的安全性。例如,设置不同级别的权限,普通操作人员只能查看数据和接收预警,而高级管理人员才能进行参数设置和故障处理。

### 五、结论

本论文对核电用安全阀的可靠性分析与智能预警系统开发进行了深入研究。通过运用故障树分析、失效模式与效应分析等方法,全面分析了影响核电用安全阀可靠性的因素,建立了合理的可靠性评估指标体系,为准确评估安全阀的可靠性提供了理论依据。基于可靠性分析结果,设计并开发了核电用安全阀智能预警系统,该系统通过传感器技术实时采集安全阀运行参数,运用数据处理与分析技术和机器学习算法对数据进行处理和故障诊断,能够及时发现安全阀的潜在故障并发出预警信号。研究表明,所提出的可靠性分析方法和智能预警系统能够有效提升对核电用安全阀运行状态的监测和管理水平,为保障核电站的安全稳定运行提供了有力的技术支持。然而,随着核电站技术的不断发展和对安全性要求的日益提高,未来还需要进一步优化可靠性分析方法和智能预警系统,提高系统的准确性、可靠性和智能化水平,例如引入更先进的传感器技术、优化机器学习算法、加强系统的自适应能力等,以更好地满足核电站安全运行的需求。同时,还需要加强对智能预警系统的维护和管理,确保其长期稳定运行,为核电站的安全运行提供持续保障。

### 参考文献

- [1]孙哲,罗乔军.核电站中安全阀的常见故障及分析[J].通用机械.2010,(12).20-23.
- [2]李庆华,丁佳鹏.核电 MSR 先导式安全阀典型故障分析及改进应用[J].汽轮机技术.2023,65(4).
- [3]郑梦建.核电站控制系统虚拟人机界面及预警功能的开发[D].江苏:东南大学,2012.
- [4]余斌克,施天姿,唐钰淇,等.核电站失水事故的智能预警及仿真方法研究[J].仪器仪表用户,2021,28(12):35-40.