

Application and improvement of analog sensor condition maintenance technology in nuclear power plant

Hongqing Zhou Shiqing Wang Lin Chen

China General Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

Analog sensors in nuclear power plants are involved in reactor protection and control, and are of great importance. Due to factors such as environmental radiation and special processes, their maintenance is often difficult. Experience feedback analysis shows that frequent preventive calibrations may introduce risks such as installation errors and improper operations, which is not conducive to the reliable operation of equipment. The application of condition-based maintenance technology can reduce the impact of invasive maintenance activities on important analog sensors and improve equipment reliability. This paper introduces the condition-based maintenance technologies for typical sensors in nuclear power plants, including visual inspection, verification, calibration and other methods, which run through the entire nuclear power operation cycle. Improvement suggestions are put forward based on engineering application practice experience.

Keywords

nuclear power plant; analog sensor; condition-based maintenance technology

模拟量传感器状态维修技术在核电厂的应用及改进

周红清 汪世清 陈林

中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518000

摘要

核电厂模拟量传感器参与反应堆保护与控制, 重要性很高; 受环境辐照、特殊工艺等因素影响, 维修难度往往较大。经验反馈分析表明, 频繁的预防性校验会引入安装错误、操作不当等风险, 不利于设备的可靠运行。状态维修技术的应用, 能够减少侵入式维修活动对重要模拟量传感器的影响, 提高了设备可靠性。本文介绍了核电厂典型核电厂传感器的状态维修技术, 这些技术包括目视检查、验证、校验等方法, 这些方法贯穿于整个核电运营周期。结合工程应用实践经验提出了改进建议。

关键词

核电厂; 模拟量传感器; 状态维修技术

1 概述

状态维修技术(Condition Based Maintenance)简称CBM, 也称作基于状态的维修, 是相对于故障维修(Breakdown Maintenance, 简称BM)和基于时间的预防性维修(Time Based Maintenance, 简称TBM)而提出的^[1]。状态维修技术通常针对关键机电设备, 利用状态监测、分析诊断技术, 识别设备异常, 诊断设备故障, 预测发展趋势, 并据此制定维修计划, 达到预测性维修(Predictive Maintenance)的目的。近年来, 状态维修技术蓬勃发展, 在各行业获得了广泛应用。模拟量传感器则通常被视为附属设备, 多采用故障维修策略, 个别采用定期更换策略。根据

模拟量传感器的特点, 核电厂采用了状态维修方法并取得良好的效果。

2 核电厂模拟量传感器的特点

与常规电厂相比, 核电厂核岛工艺系统使用的模拟量传感器有其特点:

2.1 系统设计

核岛工艺系统使用大量模拟量传感器参与反应堆保护与控制, 直接或间接承担核安全功能, 重要性不言而喻。系统设计方面, 需要考虑功能分级、响应时间、事故工况需求、监管单位的监管等。

2.2 设备选型

对于承担核安全功能的核级设备, 必须符合HAF102《核动力厂设计安全规定》中关于设备质量鉴定方面的规定。

目前国内核电厂电气设备鉴定主要依据美国IEEE和法

【作者简介】周红清(1978-), 男, 中国云南大理人, 本科, 高级工程师, 从事核电仪控系统的设备管理及研究。

国 RCC-E 系列标准。以法国 RCC-E 标准为例,核级电气设备质量鉴定程序包括四类,所有核级电气设备必须符合标准鉴定程序,以及 K1、K2 或 K3 鉴定程序中的一种^[2]。

1) 标准鉴定程序,用来验证设备在正常工况下有能力完成其设计功能;

2) K3 级鉴定程序,用来验证安装在安全壳外的设备在正常工况和在地震载荷下有能力完成其设计功能;

3) K2 级鉴定程序,用来验证安装在安全壳内的设备在正常工况和在地震载荷下有能力完成其设计功能;

4) K1 级鉴定程序,用来验证安装在安全壳内的设备在地震载荷和正常工况、事故工况及(或)事故后工况下有能力完成其设计功能。

2.3 维修实施

核电厂模拟量传感器维修作业实施难度比较大,原因主要来自如下几个方面:

1) 作业环境不良,主要来自辐照、高温、高压等因素。部分模拟量传感器因为功率运行期间不具备维修条件,故障后不得不停堆处理,给核电厂带来巨大的经济损失。

2) 维修工艺复杂。很多核级传感器在设计、制造阶段,为满足事故工况要求,采用了特殊工艺,包括专用的连接件、密封件、拆装工具以及高标准的紧固、温湿度控制、安装工艺要求等,导致维修质量控制的难度很大。

3) 维修时间限制。执照文件对部分模拟量传感器的可用性有明确要求,核电厂必须在规定时间内完成修复。

3 核电厂模拟量传感器的状态维修方法

核电厂模拟量传感器参与反应堆保护与控制,承担核安全功能,重要性高;设备选型严格,可靠性较高;受环境辐照、特殊工艺等因素影响,维修难度大;因此,传统的 BM 或 TBM 维修策略难以满足核电厂的运维需求。根据行业经验反馈分析结果,核电厂对重要模拟量传感器开展了针对性的 CBM 应用,取得了良好的效果。

核岛工艺系统模拟量传感器的测量参数主要包括压力、温度、液位、流量。目前核电厂开展 CBM 应用的模拟量传感器主要是压力/压差式传感器和温度传感器,下文详细论述。对于基于其他测量原理的传感器,例如超声波流量计、热式质量流量计等,亦可基于设备特点开展针对性的 CBM 应用。

3.1 压力式传感器的状态维修方法

经验反馈分析表明,核级压力式传感器的故障分布曲线与传统的浴盆曲线(图1)吻合程度并不高,分析主要原因来自如下几点:

1) 随着电气产品可靠性工程技术的应用,通过可靠性筛选、生产工艺核验、过程质量管理等手段,设备的固有可靠性较高,早期失效故障率得以有效控制。

2) 侵入式的预防性维修活动中,因安装错误、操作不当、

充水排气不充分等原因,导致传感器出现介质泄漏、测量偏差、信号波动等情况,比传感器出现随机失效更为常见。

3) 重要模拟量传感器 TBM 策略比较保守,在进入老化失效阶段前已完成预防性更换。

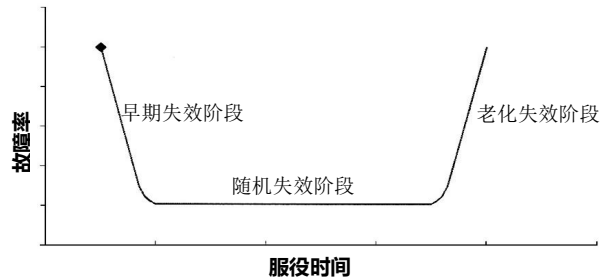


图1 典型故障分布曲线—浴盆曲线

压力式传感器的侵入式预防性维修活动主要指定期校验。为减少频繁校验带来的不利影响,核电厂针对性开展了 CBM 应用,采用如下四种维修活动的组合,以提高设备可靠性:

1) 一致性检查:对于冗余配置的传感器,持续或短周期对测量通道之间的偏差进行检查。

2) 目视检查:检查传感器是否存在泄漏、腐蚀等情况及机械损坏、紧固不良等风险。

3) 验证:选定一个合适的基准状态,在不破坏传感器电气回路的情况下,读取测量值与参考值进行比较,其偏差需要符合预先计算的准则。验证包括交叉比较、零点检查两种方式。

4) 校验:传感器需要退出运行,属于侵入式的维修活动。传感器验证是 CBM 应用的关键环节,具体方法介绍如下:

1) 选定基准状态:消除工艺系统对测量的影响,以准确评价传感器的性能。

2) 确定参考值:交叉比较一般选择冗余传感器测量值的平均值作为参考值,也可用外部测量值做参考;零点检查使用已知的、自然的物理状态作为参考值。

3) 计算偏差准则:包括设备降级准则和功能失效准则。从设备角度考虑,在校验精度基础上,叠加正常工况下传感器随时间、温度、静压的漂移影响后,得到传感器的允许误差,即为设备降级准则;从设计角度考虑,根据系统功能上传感器的允许误差,扣除参考值的不确定度后,得到功能失效准则。

计算偏差准则时,关键在于评估测量结果的不确定度,需要对测量过程中诸多分量进行分析、评定,再经过合成运算而得出。对这些分量的评定过程,工程应用上分类如下:

OA 类评定:对在规定测量条件下测量的量值,用统计分析方法对测量不确定度分量进行的评定;

OB 类评定:用不同于 A 类评定方法对测量不确定度分量进行的评定。

对于A类评定方法,测量误差服从正态分布,分布概率和包含因子关系如表1所示,工程应用一般要求置信度达到95%,故包含因子一般取1.96。

表1 正态分布的分布概率和包含因子

分布概率	0.5	0.68	0.9	0.95	0.9545	0.99	0.9973
包含因子	0.675	1	1.645	1.96	2	2.576	3

对于B类评定方法,常用非正态分布的分布概率和包含因子如表2所示。

表2 常用非正态分布的分布概率和包含因子

分布类型	分布概率(%)	包含因子
矩形(均匀)	100	1.732
三角形	100	2.449
反正弦	100	1.414
两点	100	1

对测量过程的不确定度分量进行评定后,按如下方法进行合成运算^[3]:

Ø 直接测量时,被测量 $y=x$, 不确定度为:

$$U = 1.96 \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{RA1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{RA2}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{RB1}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{RB2}}{\sqrt{3}}\right)^2 + u_{s1} + u_{s1}}$$

ε_{RA1} 、 ε_{RA2} : A类测量不确定度(服从正态分布)

ε_{RB1} 、 ε_{RB2} : B类测量不确定度(以均匀分布为例)

u_{s1} 、 u_{s2} : 系统不确定度(系统误差)

Ø 间接测量时,被测量 y 由 n 个变量 X_i 通过函数 $y=f(x_i)$ 确定,不确定度为:

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial f}{\partial X_i} (x_i) \right)^2 \cdot u_i^2 \right]}$$

式中 u_i 为各变量的不确定度。

由于间接测量的不确定度合成计算过程相对复杂,以采用节流件的差压式流量传感器为例进行说明。采用节流件的差压式流量计算方法为:

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta P}$$

式中 Q 为流量, k 为系数(与节流件尺寸、流体密度、流量系数等有关), ΔP 为压差。计算流量 Q 的不确定度时,计算公式如下:

$$\varepsilon_Q = Q \cdot \sqrt{\varepsilon_k^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{Q_{\max}^2}{Q^2} \cdot \varepsilon_{\Delta P} \right)^2}$$

式中 ε_Q 为流量测量不确定度 (m^3/h), Q 为流量测量值 (m^3/h), Q_{\max} 为流量最大值 (m^3/h), ε_k 为节流装置不确定度(%), $\varepsilon_{\Delta P}$ 为传感器技术精度(%).

4) 得出验证结果:将测量值与参考值的偏差与准则进行比较,若超出设备降级准则,通常要求执行校准,但不需

要立即执行,可以延迟处理;若超出功能失效准则,通常要求立即执行校准。

3.2 温度传感器的状态维修方法

核电厂温度传感器主要包括热电阻、热电偶两类:热电阻以Pt100为主;热电偶以K型为主。经验反馈分析表明,核级温度传感器本身具有高可靠性,主要故障来自环境影响、侵入式维修等外部因素。为持续评估环境因素对核级温度传感器的影响、减少侵入式维修的不利影响,核电厂针对性开展了CBM应用:

1) 验证:当工艺系统处在某个稳定的工况下执行同一个测量位置的不同温度传感器之间的互相比较验证。2) 校验:检查传感器响应曲线与理论值之间的偏差在允许误差范围之内。3) 绝缘连续性检查:通过绝缘连续性检查来评估传感器的性能。连续性检查不满足要求,需要进行检查;绝缘检查不满足要求,需要进行更换处理。

4 核电厂模拟量传感器的维修策略改进

经实践验证,核电厂模拟量传感器的状态维修技术应用效果良好,从维修方法及推广应用方面,提出两点改进建议。

4.1 传感器验证自动化

目前的传感器验证方法只能检查刻度曲线上的一个工作点,结果评估需要考虑概率影响,具有一定的局限性。国内核电厂仪表和控制系统普遍采用DCS(Distributed Control System)技术,可在DCS中对测量通道之间的偏差进行实时计算并自动触发预警。传感器验证同样可以利用DCS自动完成:当系统状态具备零点检查条件时,实时执行零点检查;

4.2 CBM应用普及化

核电厂模拟量传感器数量庞大,维修策略以TBM为主,仅特别重要的压力/压差式传感器和温度传感器开展了CBM应用,预防性维修工作量仍较大,重要模拟量传感器的CBM应用经验可以推广应用至其他模拟量传感器。

5 结语

核电厂模拟量传感器不宜视作附属设备,其维修策略值得深入探讨,状态维修是极有价值的探索方向。经实践验证,核电厂模拟量传感器的状态维修技术应用效果良好,后续宜结合DCS实现自动化;同时建议以经验反馈为基础,以故障模式分析为依据,推广应用至其他模拟量传感器,保证设备可靠性的同时,也能降低维修成本。

参考文献

[1] 代科学,等.状态维修理论、技术与实施[J].航空制造技术,2005年第1期101-105.
 [2] 叶蓓.浅析压水堆核电厂电气设备的安全分级和RCC-E质量鉴定等级[J].经济技术协作信息,2015(10)总第1209期,78-79.
 [3] 陈永伟,等.工程不确定度计算与交叉验证.中国原子能出版社,2020.3ISBN 978-7-5221-0505-5.