

核级电动截止阀多因素耦合强化试验与控制方式改进研究

吴小飞, 黄茂丽, 张林, 聂常华, 徐长哲, 徐尧, 卓文彬, 李朋洲

Multifactorial Coupling Enhancement Testing and Research on Improvement of Control Mode of Nuclear-grade Electric Shut-off Valve

Wu Xiaofei, Huang Maoli, Zhang Lin, Nie Changhua, Xu Changzhe, Xu Yao, Zhuo Wenbin, and Li Pengzhou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2024.03.0219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

核电厂应急柴油发电机先导电磁阀改进研究

Research on Improvement of Pilot Solenoid Valve for Emergency Diesel Generator in Nuclear Power Plant

核动力工程. 2023, 44(6): 226–230

基于Hilbert–Huang变换和BP神经网络的核级电动阀门退化趋势预测

Degradation Trend Prediction of Nuclear-level Electric Valve Based on Hilbert–Huang Transform and BP Neural Network

核动力工程. 2022, 43(3): 179–184

核电厂主蒸汽隔离阀控制系统故障分析及可靠性提升

Failure Analysis and Reliability Improvement of Control System of Main Steam Isolation Valve in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2021, 42(1): 138–142

NUSTER–100电功率串级控制方法研究

Research on Cascade Control Method of Electric Power of NUSTER–100

核动力工程. 2023, 44(4): 154–162

可动电磁型控制棒驱动线可靠性增长试验及改进研究

Reliability Growth Test and Improvement of Electromagnetic Movable Coil Control Rod Drive Line

核动力工程. 2019, 40(3): 130–133

一种常闭翅片式冷冻阀的结构设计与有限元分析

Structural Design and Finite Element Analysis of a Normally–Closed Finned Freeze Valve

核动力工程. 2019, 40(6): 149–154



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2024)03-0219-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2024.03.0219

核级电动截止阀多因素耦合强化试验与控制方式改进研究

吴小飞, 黄茂丽, 张林, 聂常华, 徐长哲, 徐尧, 卓文彬, 李朋洲

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 阀门作为核反应堆系统中的关键能动设备, 其可靠性直接决定着反应堆安全及人员安全。针对核电厂常用阀门——电动截止阀, 基于既往故障数据分析和结构特点, 发现核级电动截止阀的主要故障是位置指示器与行程位置不匹配导致阀门内漏。以此为基础设计了耦合强化试验, 模拟综合使用工况下的振动强化效应, 使得在较短时间内激发电动截止阀的故障, 然后根据故障原因提出以堵转电流控制关阀的方式解决内漏问题。试验结果表明, 改进控制方式后以转矩控制机构控制关闭, 电动截止阀关闭正常无泄漏。

关键词: 电动截止阀; 强化试验; 转矩控制机构; 改进研究

中图分类号: TL333 **文献标志码:** A

Multifactorial Coupling Enhancement Testing and Research on Improvement of Control Mode of Nuclear-grade Electric Shut-off Valve

Wu Xiaofei, Huang Maoli, Zhang Lin, Nie Changhua, Xu Changzhe, Xu Yao, Zhuo Wenbin, Li Pengzhou

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: As the key active equipment in the nuclear reactor system, the reliability of valves directly determines the safety of nuclear reactors and personnel. In this paper, aiming at the common valves (electric shut-off valve) in nuclear power plant, and based on the analysis of previous fault data and structural characteristics, it is found that the main fault of the electric shut-off valve is that the position indicator does not match the travel position, resulting in internal leakage of the valve. On this basis, the coupling enhancement test scheme was designed to simulate the vibration strengthening effect under comprehensive conditions. The failure of electric shut-off valve was stimulated in a relatively short period of time in the test. Finally, it was proposed to change the drive control mode to solve the problem of internal leakage of electric shut-off valve according to the cause of fault. The test results show that after improving the control mode, the torque control mechanism is used to control the closing, and the valve is closed normally without leakage.

Key words: Electric shut-off valve, Enhancement testing, Torque control mechanism, Improvement research

0 引言

阀门是管路系统中基本部件, 广泛应用于能

源化工系统, 以一座 2 套百万千瓦级机组规模的压水堆核电厂为例, 阀门用量约 3 万台。核级

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2024-03-28

作者简介: 吴小飞 (1986—), 男, 副研究员, 硕士, 现主要从事核级设备特性与可靠性研究, E-mail: 13330991312@163.com

门因其特定的使用场合,与常规阀门产品相比,其可靠性水平高低对系统的安全性与维修成本影响尤为突出。相关数据表明,核级阀门最初的采购加工费用相对于阀门全寿期使用费用大约只占 20%,其中大约 3/4 的费用用于维护、检修,以及因阀门故障导致系统运行中断引起的间接成本^[1]。因此,有必要对核级阀门进行深入研究,分析其典型失效模式和改进措施,为核级阀门的设计、制造工艺及维修保养周期的优化提供依据。

强化试验的目的是在较短的试验时间内激发出故障,该技术最早源自 20 世纪 50 年代的老化试验,其理论依据是故障物理学,通过对故障或失效的研究,发现和根治故障以达到提高可靠性的目的^[2]。在国外,强化试验在电子行业得到广泛应用,Gusciora^[3]等对电子设备开展高加速因子寿命试验研究。国内的强化试验多基于电子产品对象开展研究,对于机械设备领域的应用处于摸索阶段。本文将振动强化试验技术应用于核级典型阀门,目的是通过强化试验在比较短的时间内获得其典型的失效模式,并基于失效原因提出改进措施,以提高整机的可靠性。

1 研究对象遴选

据相关数据表明:田湾核电站 1 号机组共有阀门 1.5 万台,其中核岛用阀门约 0.65 万台,常规岛用阀门约 0.68 万台,电厂辅助设施用阀门 0.17 万台。相应配置比例分别为:核岛为 43%,常规岛为 45%,电厂辅助设施为 12%。其中核岛中阀门主要有安全阀、闸阀、逆止阀、调节阀、减压阀、隔膜阀、截止阀、球阀、蝶阀、疏水阀及其他阀门等 11 个类型共计 6500 余台,截止阀在各类阀门占比最多约为 34%。

根据阀门失效数据统计:截止阀占 29.51%,逆止阀占 21.86%,未说明种类阀门占 19.67%,调节阀占 12.57%,具体失效情况占比见图 1。

根据上述数据,确定选择核级电动截止阀作为研究对象,最后确定为巴基斯坦卡拉奇核电站 K2/K3 机组(华龙一号)安注系统旁通支路上的 DN50 电动截止阀。该阀门是截止阀典型结构,并且其核心部件为扬州电力设备制造厂的核级主打 2HA3 电动执行机构,以该阀作为研究对象具有典型代表意义。

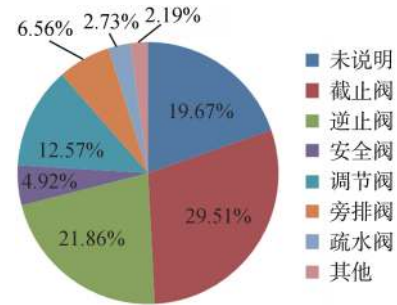


图 1 阀门失效占比情况

Fig. 1 Proportion of Valve Failures

2 分析对象

DN50 电动截止阀主要由阀体、阀座、阀瓣、驱动装置、限位开关等组成,阀门通过驱动装置实现开启和关闭。该电动截止阀样机的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 电动截止阀样机主要设计参数和指标

Tab. 1 Main Design Parameters and Indicators of Electric Shut-off Valve

参数名	参数值
通径	DN50
运行压力/MPa	12.0
最高工作温度/°C	120
最大工作压差/MPa	12.0
质保等级	QA1
安全级	2
抗震等级	1A
电气鉴定程序	K3
设计寿命/a	60
开关时间/s	≤25
驱动装置功率/kW	0.75

3 失效模式分析

根据对电动截止阀任务的描述,可以对其功能进行分析。阀门功能的实现是几个分系统配合完成的:在得到控制系统的开关阀控制信号后,电机启动,将电能转化为转子动能,转子连接减速器,再带动阀杆运动;阀杆与阀瓣相连,通过阀瓣与阀体密封座的配合实现流通的通断。在发出控制信号后,阀门完成开关动作的时间不大于 25 s,关闭时克服回路压力阻断流体的流动,开启时能克服进出口压差恢复流道畅通,整个过程零外漏。

电动截止阀各个功能系统之间的工作原理如图2所示，图中各分系统括号中的数字是失效模式和影响分析中的分级编号，实线图框表示阀门部件，虚线图框表示流体边界。

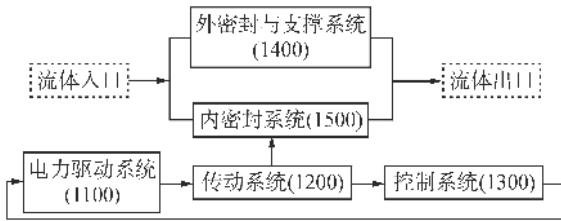


图2 电动截止阀的功能框图

Fig. 2 Functional Block Diagram of Electric Shut-off Valve

基于既往的故障数据分析和上述结构分析，确定该截止阀的典型失效为复杂使用工况引起阀门位置指示器与行程位置不匹配导致阀座内漏。

4 多因素耦合强化试验

根据典型失效模式，提出以振动强化方式开展试验，实现较短时间内激发故障的目的。振动耦合强化试验研究阀门在内环境载荷、外环境载荷和振动载荷共同作用下的故障及性能。

4.1 试验装置

装置整体分为环境箱、振动台、回路系统、数据采集系统和电气系统，其中的核心部分环境箱与振动台的关系如图3所示。

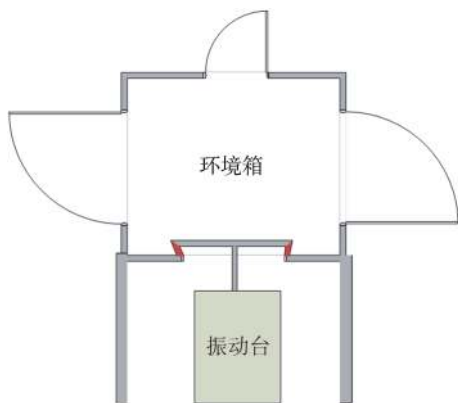


图3 多应力综合试验装置示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Multi-stress Comprehensive Test Device

环境箱、振动台和回路系统提供阀门应力施加环境，数据采集系统实现试验参数采集与控制，电气系统用于向用电设备和仪器仪表提供电源。

环境箱及振动台通过密封橡胶连接在一起，保证内外环境的密封特性。试验阀安装在振动台上，试验阀两端通过软管接入回路系统。回路系统提供阀门试验时所需的内环境工况（回路温度、压力），环境箱提供阀门试验时所需的外环境工况（环境温度、湿度），振动台提供阀门试验时所需的振动或地震载荷。

4.2 试验工况

(1) 内部工质热态试验工况：系统压力为 12.0 ± 0.5 MPa；系统温度为 120 ± 3 °C；电机驱动电压为 380 V；升降温速率小于 40 °C/h。

(2) 环境箱：温度为 65 ± 2 °C；湿度为 $75 \pm 2\%$ 。

(3) 振动及试验条件：0.75g（g为重力加速度）的正弦扫描激振信号，扫描频率范围从 5 Hz 到 100 Hz 再到 5 Hz，扫描速度为每分钟 2 倍频程。耦合强化试验分振动的 3 个方向分别进行 90 次（根据设计手册统计全寿期动作次数要求并考虑 15% 裕量），3 个方向分别为 X 方向（阀门安装管线方向）、Y 方向（与阀门安装管线水平垂直方向）、Z 方向（与阀门安装管线竖直垂直方向，即阀门上下方向），3 个方向示意图见图 4。

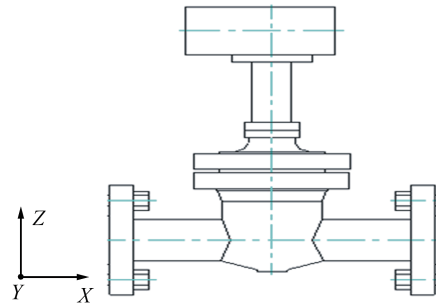


图4 振动的3个方向示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Valve Vibration in Three Directions

4.3 关键参数测量

(1) 阀座密封泄漏监测

电动截止阀关闭后通过开启后端泄压系统的手动仪表阀进行泄压直至为大气压力，使得试验截止阀前后建立额定压差，压差建立后，记录泄压仪表阀后端的泄漏情况。

(2) 启闭动作时间监测

将电动截止阀的限位开关信号接入控制系统，由开启或关闭动作触发信号作为零时刻，当阀门

开启或关闭到位时, 限位开关的反馈信号作为终了时刻, 终了时刻与零时刻的差值即为阀门开启或关闭的动作时间。

(3) 启闭过程电流监测

将电动截止阀执行机构的电流信号接入控制系统, 监测阀门在启闭过程中的电流大小、波形等信号, 作为判断阀门动作是否正常、是否出现故障的参考数据。

(4) 阀门动作时振动监测

振动测点布置在电动截止阀中法兰处及阀门重心处, 振动信号接入控制系统, 监测阀门在启闭过程中的振动大小, 作为判断阀门动作是否正常、是否出现故障的参考数据。

(5) 流量

在电动截止阀上进口支路上设置 DN15 的文丘里流量计, 用于测量阀门开关过程中的流量情况。

4.4 试验结果

多因素耦合强化试验在内环境高温高压、外环境温度、外环境湿度和振动耦合工况下验证试验阀工作性能, 具体 3 个方向试验结果如下:

(1) Y 方向振动耦合强化试验过程中, 试验阀开关动作正常, 无卡滞、卡死等现象; 开阀全行程时间为 10.8~10.9 s, 关阀全行程时间为 11.2~11.3 s; 试验过程中阀门零部件无松动、断裂或明显变形和错位等现象; 试验阀关闭后试验回路流量为 0。

(2) X 方向振动耦合强化试验共计进行开关动作 83 次时, 试验阀关闭后试验回路流量仍有 2 m³/h, 发生内漏, 如图 5 所示。

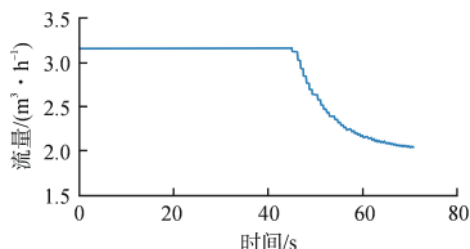


图 5 试验阀开关动作 83 次以后关闭过程试验回路流量变化图

Fig.5 Flow Change of Test Circuit during Closing after Test Valve is Switched On and Off for 83 Times

(3) Z 方向振动耦合强化试验过程中, 试验阀开关动作正常, 无卡滞、卡死等现象; 开阀全

行程时间为 10.6~10.9 s, 关阀全行程时间为 11.3~11.4 s; 试验过程中阀门零部件无松动、断裂或明显变形和错位等现象; 试验阀关闭后试验回路流量为 0。

4.5 结果分析

该安注系统电动截止阀样机按标准 NB/T 20036.6-2011《核电厂能动机械设备鉴定 第 6 部分: 阀门组件鉴定》等相关要求, 完成了核级设备鉴定 (包含 2000 次动作寿命试验^[4]), 说明单一工况下无故障动作寿命达到 2000 次以上。

通过高温高压工况下多因素耦合强化试验技术, 即阀门在内环境高温高压、外环境温度、外环境湿度耦合振动应力可快速激发潜在故障模式, 大大缩短试验时间成本, 加快了研发、试验周期之间的改进反馈, 促进了设备研发进程。

5 改进研究

通过多因素耦合强化试验的开展, 快速地激发了电动截止阀的潜在故障内漏 (由阀门电动执行机构的关限位波动偏离了预先设置好的限位位置导致)。2HA3 电动执行机构作为一种典型的核级电动执行机构, 内设有 2 套控制机构: 行程控制机构和转矩控制机构。在核电厂使用过程中基本上都是采用行程控制机构进行阀门开关控制, 转矩控制机构为阀门的保护机构。基于此分析, 决定开展试验以验证阀门通过转矩控制机构时阀门能否关到位。

试验方法为分别通过行程控制机构和转矩控制机构控制试验阀开关, 采集试验阀关阀过程的电流, 并在关阀后检测阀座的内密封性能, 对这 2 种控制方式进行比较。

在行程控制机构控制下, 试验阀以正常驱动电压进行关动作试验, 试验阀关闭后, 阀门前后两端建立压差 (12.0±0.5 MPa) 对阀座的密封性能进行检查时, 阀门内漏量超过 20 cm³/h。

随后在转矩控制机构控制下, 试验阀同样以正常驱动电压进行关动作试验, 试验阀关闭后, 阀门前后两端建立压差 (12.0±0.5 MPa) 对阀座的密封性能进行检查时, 阀门无内漏。通过上述对比试验, 可发现阀门以转矩控制机构与行程控制机构控制相比, 关闭到位后出现了堵转电流, 堵转电流波形如图 6 所示。即转矩控制模式以关

阀到位后出现堵转电流作为控制反馈信号，保证了关阀动作过程阀瓣与阀座充分接触，并关闭到位。

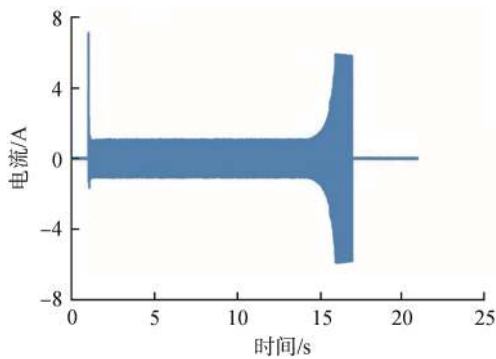


图6 转矩控制机构控制下关阀过程电流波形图

Fig. 6 Current Waveform for Valve Closing Process under the Control of Torque Control Mechanism

6 结论

本文针对核级电动截止阀开展了多因素振动耦合强化试验研究，得到如下结论：

(1) 根据该电动截止阀结构和使用特点，结合初步判断失效模式的基础上，提出核级截止阀高温高压工况下多因素耦合强化试验技术，快

速地激发了潜在内漏故障，有效地缩短了试验周期。

(2) 针对目前已广泛运用于国内外多个核电厂的2HA3电动执行机构，建议根据阀门在核电厂的使用位置和要求来选择控制方式：当要求阀门较为频繁地动作，允许存在内漏或者对内漏量要求不高时，选择行程控制机构来控制阀门开关；当要求阀门必须关到位，不允许存在内漏或者对内漏量要求较高，但阀门很少动作时，选择转矩控制机构来控制阀门开关。

参考文献：

- [1] 谭术洋, 李毅, 关莉. 核级阀门故障分析及可靠性改进 [Z]. 成都: 中国核动力研究设计院, 2012.
- [2] 温熙森, 陈循, 张春华, 等. 可靠性强化试验理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-12.
- [3] GUSCIORA R H. The use of HALT to improve computer reliability for point-of-sale equipment[C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1998 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity. Anaheim: IEEE, 1998: 89-93.
- [4] 国家能源局. 核电厂能动机械设备鉴定 第6部分: 阀门组件鉴定: NB/T 20036.6-2011[S]. 北京: 中国原子能出版社, 2011: III.

(责任编辑: 马 蓉)