

电动阀门故障特征分析及检测方法研究

曾 杰 刘才学 张思强 者 娜 郑兰疆

(中国核动力研究设计院 成都 610041)

摘 要: 针对核电站电动阀门故障多发且故障类型多样的情况,通过分析电动阀门结构和动作原理,对电动阀门典型故障原因和故障信息表现形式进行了分析,研究了适用于电动阀门故障探测的信号探测方法,结合对获取的各类型信号的数据分析和处理,提出了电动阀门信号处理及特征量分析方法,通过提取电动阀门故障特征量,进一步表征阀门的故障状态。结合实际的阀门运行状态测试,表明提取的特征量能够反应电动阀门的真实故障,为电动阀门故障诊断和故障趋势分析奠定了技术基础。

关键词: 电动阀门;故障特征;故障诊断;检测方法

中图分类号: TL82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 490.15

Research on fault feature analysis and detection method of electric valve

Zeng Jie Liu Caixue Zhang Siqiang Zhe Na Zheng Lanjiang

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the frequent faults of electric valves in nuclear power plants and the various types of faults, analyzes the typical failure causes and fault information manifestations of electric valves by analyzing the structure and operation principle of electric valves, and studies the signal detection methods suitable for electric valve fault detection. Combining the data analysis and processing of various types of signals acquired, the electric valve signal processing and characteristic quantity analysis methods are proposed. By extracting the electric valve fault characteristic quantity, the fault state of the valve is further characterized. Combined with the actual valve operating state test, it is shown that the extracted characteristic quantities can reflect the true fault of the electric valve, which lays the technical foundation for the fault diagnosis and failure trend analysis of the electric valve.

Keywords: electric valve; fault feature; fault diagnosis; detection method

0 引 言

电动阀门作为管路开闭、流量控制和回路参数调节的重要设备,在石油、化工和核电等众多领域得到广泛应用^[1]。由于阀门故障造成的事故和重大经济损失时有发生,据统计在核电站40~60年的正常运行中,阀门的投资额仅占核电站总投资额的2%左右,而每年核电站花费在阀门的维修费用却占维修总额的50%以上^[2]。尤其核电站高温高压回路的电动阀门一旦出现故障可能造成重大危害,当前针对电动阀门故障及检修策略有大量的研究。文献[3]提出对于电动阀门信号的获取可通过智能定位器进行,从参数的变化可以判断出阀门的健康状态,杨垦等^[4]提出通过在阀杆上贴应变片来测量阀杆的扭矩和推力。但通常阀门工作环境不便于安装定位器或阀杆上通常没有可以粘贴应变片的位置。本文从便于电动阀门信号获取的角

度出发,研究电动阀门信号探测方法,获得电动阀门的特征信息并进行故障特征分析,对电动阀门信号探测和处理方法进行的研究,获得表征电动阀门故障信息的特征量,对及时发现大部分电动阀门潜在故障、分析故障发生原因及保障阀门健康运行具有十分重要的意义。

1 电动阀门概况及结构运行原理

电动阀门通过电动执行机构来驱动阀门从而实现阀门的开关动作,电动阀门主要由驱动电机、传动部件及阀体等组成。电动阀门由于尺寸相对较小,制造工艺要求和设备制造相对较简单,在核电站中大口径管道中使用较为普遍^[5]。本文以常见的电动阀门为例,对电动阀门故障特征和检测方法进行研究。

如图1所示,典型电动阀门主要由顶部驱动电机产生旋转作用力,依靠阀体内的阀杆螺母传动,将旋转动作转换

为阀杆的上下直线运动。电动闸阀使用一个闸门似的阀瓣或闸板去隔断流体,阀杆带动闸板上下移动,使闸板离开或嵌入阀座,从而实现对流体通道的开启和闸断。

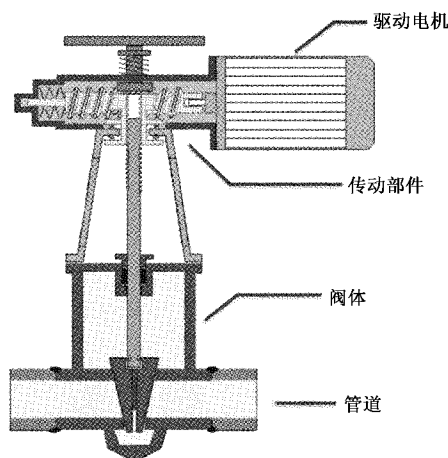


图1 电动闸阀结构示意图

2 电动阀门典型故障特征分析

电动阀门运行过程中故障多样,有时甚至互相交错或叠加^[6],根据电动阀门故障失效形式分类,可将电动阀门主要故障分为密封失效、动作失效及驱动装置失效几种^[7-8]。

2.1 密封失效故障

密封失效是不同类型电动阀门的通用故障,阀门出现密封失效可能造成重大的资源浪费和环境污染,造成密封失效的因素主要有螺栓拧紧工艺、操作人员随机性和密封结构尺寸制造差异等方面。电动阀门的密封失效主要表现为阀门中法兰密封泄漏和阀瓣密封泄漏。

1) 中法兰密封泄漏

电动闸阀中法兰密封通常采取垫片和螺栓压紧的方式进行密封,如图2所示。此种密封结构能够较好地保证高温高压介质工况下的密封性能。但由于密封面尺寸偏差、螺栓预紧力下降和长期高温高压冲击等因素可能会导致阀门中法兰密封出现泄漏。当阀门密封面泄漏时,阀门内密封介质由于高压作用会冲击中法兰密封金属壁面而激发出声信号,此时靠近中法兰密封面布置声发射传感器测量声信号的有效值会出现明显增长^[9]。

2) 阀瓣密封泄漏

阀瓣密封泄漏是指阀门阀杆旋紧到位,由于闸板和阀座密封面之间仍有缝隙,介质还是可以流过去而不能达到完全截断的作用。阀门内漏一般是由于杂质堵塞或划伤阀座密封面、高温高压高速流体介质长期的冲蚀损坏密封面等原因造成。阀门发生内漏时,同样可能引起靠近阀座位置布置的声发射传感器声信号明显增大。

2.2 动作失效故障

阀门动作失效是由于零部件之间磨损、表面材料损伤或杂质等导致运动性能下降或运动功能丧失,阀门动作失

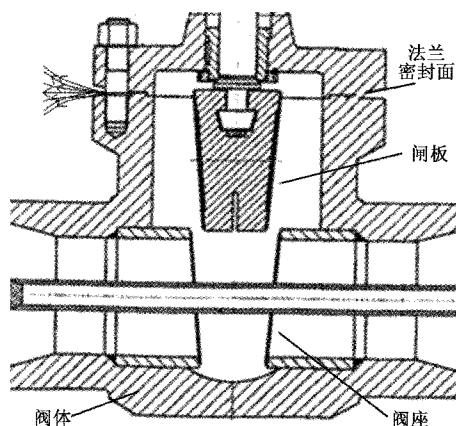


图2 中法兰密封泄漏

效主要与运动部件相关,如轴承失效、闸板卡滞和阀杆螺母传动失效等。

1) 轴承失效故障

电动阀门轴承失效是轴承轨道面与转动部件在受载荷的工况下工作,不可避免地发生材料缺失磨损和参杂杂质导致转动卡滞等情况。

电动阀门轴承的磨损在达到一定范围时,可能导致配合间隙过大从而使运动性能下降。轴承磨损是一个动态的过程,其发展过程能通过温度和振动加速度信号展现出来。电动阀门出现轴承异常磨损,运转时轴承温度会偏高,振动信号方面可能产生与转动基频相关的异常振动特征,如 $1/3f$ 、 $1/2f$ 或 $1f$ 的振动幅值明显增加,靠近轴承附近位置的振动烈度、信号有效值等也会整体增加。

由于杂质进入、润滑不足或轨道面金属疲劳剥落等原因可能导致轴承和滚珠间的摩擦阻力显著增加造成轴承卡滞。轴承卡滞时,由于异常摩擦阻力增加会导致轴承温度偏高,严重时电机驱动电流会上升,同时会产生高于正常状态的较高频摩擦噪声和冲击,因此靠近电动阀门轴承附件布置的振动加速度测量通道的噪声级、信号峭度等会整体升高。

2) 闸板卡滞故障

闸板卡滞一般是由于闸板与阀座未对中、介质中的杂质在闸板或阀座上附着沉积或密封面的腐蚀生锈等引起运动部件变形等原因引起。电动闸阀闸板出现卡滞时,靠近阀座位置布置的振动加速度传感器测量通道信号的噪声级、有效值等会整体增加,当出现严重卡滞时,电动阀门电机的驱动电流会明显升高。

3) 阀杆螺母传动失效

阀杆螺母传动失效是指电动阀门阀杆等传动部件由于杂质渗入、长期氧化锈蚀物等附着在传动部件滚道周围,导致阀杆螺母传动部件摩擦阻力增大并伴随着异常摩擦噪声。通过在靠近丝杆附近的阀体外壁布置加速度传感器其信号的有效值、噪声级等特征参数会整体增加,同时由于丝杆锈蚀部位与滚珠等摩擦碰撞使加速度信号具有一定冲击

成份,因而信号的方差、峭度等特征参数会出现较明显变化。

2.3 驱动电机失效故障

由于电动阀门工作环境潮湿、驱动装置绝缘性能降低或屏蔽套出现裂纹等,驱动装置的线圈会吸收一些潮湿空气使电机绝缘电阻下降从而影响电机运行。驱动电机再运行一定时间后可能存在输出功率不满足阀门驱动要求,这种情况一般需要更换功率合适的电机。另外,由于人员操作不当或其他不确定因素还可能导致电机故障。驱动电机失效从信号特征上最主要会导致电机的线圈电流及电机运行行程时间等变化。

通过电动阀门故障特征分析,能够掌握电动阀门故障原因及故障时产生的信号特征,有助于进一步掌握电动阀门信号获取方法。

3 电动阀门探测方法研究

当电动阀门出现不同类型的故障时,会在不同类型的信号中有所体现。根据电动阀门结构原理和不同类型故障的产生机理,对电动阀门信号获取的探测方法进行研究,常见的探测方法主要有电流探测、动作噪声探测、声发射信号探测等^[10]。

3.1 电流探测原理

电动阀门驱动电机的电流运行参数能反映阀门很多运行状态信息,包括转速、齿轮啮合频率、捶击、阀杆运动、阀瓣落位等^[11]。为获得阀门的电机电流且不破坏和切断阀门导线,可采用钳形电流传感器或霍尔传感器对线圈的电流进行探测^[10],如图3所示。

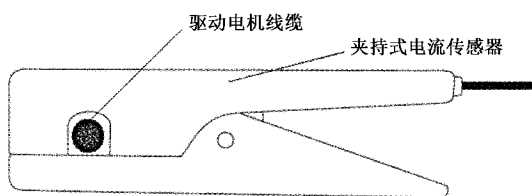


图3 电机电流信号测试示意图

穿过传感器的被测电路导线成为电流互感器的一次线圈,通过的电流便在二次线圈中感应出输出电流。

二次线圈输出电流 I_2 与一次线圈电流 I_1 的对应关系可由式(1)表示。

$$I_2 = I_1 \cdot K \quad (1)$$

其中, K 为电流比,通过感应的二次线圈电流便可反映驱动电机的实际电流。

3.2 动作噪声探测原理

电动阀门在运行过程中可能产生摩擦、磨损、碰撞等结构噪声,这些结构噪声的能量会经过固体振动辐射到外界,通过布置加速度传感器可测量阀门的结构动作噪声,如图4所示。

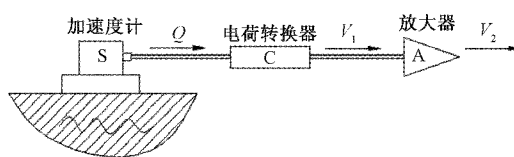


图4 加速度传感器测量阀门动作噪声

加速度传感器将振动噪声转换成电荷信号,经电荷转换器转换成电压信号,增益后再进行信号的 A/D 转换,其噪声加速度可由式(2)表示。

$$a = \frac{1\,000\,V}{S \cdot C \cdot A} \quad (2)$$

式中: a 为加速度(g); S 为加速度传感器灵敏度(pC/g); C 为电荷转换器转换系数(mV/pC); A 为增益倍数; V 为输出电压(V)。

3.3 声发射探测原理

电动阀门在压力工况下可能发生内漏、外漏等情况,此时流体冲击金属器壁激发的应力波可采用声发射传感器进行检测,该技术是目前较常用的泄漏检测技术^[12-15]。阀门的泄漏状况可由声发射信号的大小来表征,其 RMS 值在一定条件下和泄漏率成正相关关系。声发射信号的 RMS 值 U 与声压 V 存在如式(3)所示转换关系,设转换系数为 X ,则:

$$20\log_{10} X = K \quad (3)$$

式中: $X = U/V$, K 为声发射传感器灵敏度,灵敏度越大,转换的信号越大。

通过电动阀门信号探测方法研究,能够掌握电动阀门探测传感器原理及布置方法,最终探测到与电动阀门故障相关的信号。

4 电动阀门信号处理及特征量提取方法研究

在利用传感器探测到电动阀门的信号后,针对获取的信号需要作进一步的信号分析处理,以便提取到真正能反映阀门故障信息的特征量。

4.1 电流信号分析

驱动电机通常采用三相交流电(I_a 、 I_b 、 I_c , 频率为 50 Hz), 电流实时信号为波动信号, 对电流信号进行连续采样, 可提取阀门开启或关闭整个过程中驱动电机三相电流信号的有效值 I_{RMS0} 和最大值 I_{max} , 分别代表了电机运行电流的整体平均水平和最大值水平, 其计算方法如下:

设 $x(t)$ 为电机电流的连续时间采样数据序列, 则:

$$I_{RMS0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (4)$$

$$I_{max} = \max\{x(1), x(2), \dots, x(t)\} \quad (5)$$

式中: T 为求积分时间(采样时间)。

为了能够较好反映阀门开启或关闭过程中电机电流的实时变化情况, 可对连续采集的电流信号实时提取较短时间周期 T_s 内的电流信号有效值 I_{RMSi} 序列, 获得 I_{RMSi} 的实时变化曲线如图5所示。

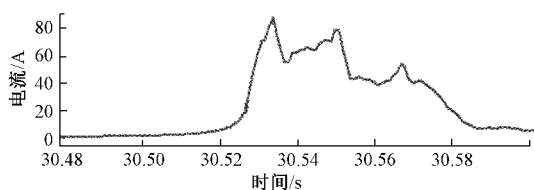


图5 电机电流短有效值变化曲线

通过分析电流短有效值 I_{RMS} 序列的实时变化曲线,可以得到开阀或关阀过程中电机的运行时间 T ,进一步可获取电流信号时程波形 I_C 及电流有效值 I_{RMS} 。在阀门开、关过程中获取电机开阀峰值电流、关阀峰值电流、阀瓣落座时尖峰电流及开关阀过程的运行电流,如图6所示。开阀峰值电流、关阀峰值电流和阀瓣落座尖峰电流可对应分析出开阀时阀瓣的最大拔出力、关阀最大启动力和阀瓣落座力等信息。

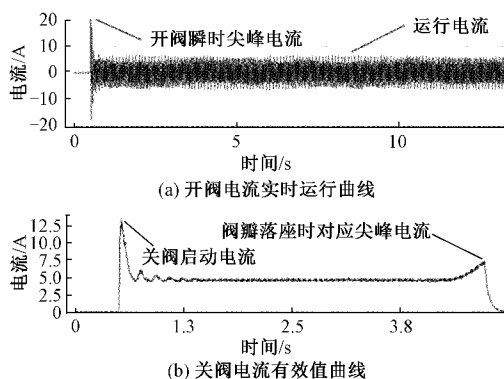


图6 阀门开关过程电流信号分析

4.2 振动信号分析

根据电动阀门开、关过程的加速度动作响应,可分别将开阀和关阀过程分为3个动作段。以开阀为例,第1段是启动电机,传动机构开始动作,闸板离开阀座;第2段是电机平稳运行,传动机构平稳运行,闸板平稳提升的过程;第3段是阀门开启到位,传动机构及电机停止运行,关阀过程大体上是开阀的逆过程。对按照3个区间段可分别对各段加速度信号进行时域和频域分析。

1) 振动信号时域分析

时域内分析加速度信号,可通过波形图观察电动阀门运行噪声变化,在电机启动和停止的第1段和第3段,提取振动信号的冲击能量,在阀门平稳运行的中间第2段,提取信号的冲击频度和加速度级。

(1) 冲击能量

冲击能量总体表征阀门在开启和关闭等过程产生的振动冲击大小,计算阀门的电机启动和停止过程(第1段和第3段)加速度信号的能量大小。

(2) 冲击频度

冲击频度为单位时间内的超过设定阈值的冲击波峰个

数,对阀门运行过程中的噪声信号设定阈值,寻找阀门运行过程(第2段)时程幅值超过设定阈值的冲击波峰个数。

(3) 加速度级

计算加速度级是对电动阀门运行噪声进行一个宏观的评价。设间隔50mm的数据块为 $a_i (i=0,1,\dots,n-1)$,则阀门开、关过程的加速度 a_{dB} 由下式确定:

$$a_{dB} = 20 \log \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}}{a_0} \quad (6)$$

其中, $a_0 = 1 \mu\text{m/s}^2$, 是基准值。

2) 振动信号频域分析

频域分析主要诊断阀门平稳动作的第2段,包括低频段和高频段的频谱分析。

(1) 低频段频谱分析

由于电动阀门的转子部件转速低,所以对信号进行低频段频谱分析有意义。在低频段主要提取的特征量为特征频率及其幅值,如转动频率及其倍频。

(2) 高频段频谱分析

电动阀门在故障状态下会发生碰摩,产生的信号频率一般较高,在高频段提取特征量为特征频段幅值。通过计算10kHz内包含高频分量的特征频段幅值和分析电动阀门运行状态。

通过对不同故障类型及严重程度的加速度信号的频域分析,可探索特征频率和幅值与门故障类型及严重程度的关系^[16]。

4.3 声发射信号分析

阀门泄漏产生的声发射信号为连续型声信号,可获取声发射信号有效值(RMS值),结合声发射传感器的灵敏度统一转换为声压(uBar)来表征信号大小。

根据连续型泄漏声发射波形特点,可提取信号的有效值 V_{RMS} 来表示泄漏声信号的大小,其计算方法如下:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} (V(t))^2 dt} \quad (7)$$

式中: T 为采样时长,单位为s,且 $T = T_2 - T_1$; $V(t)$ 为声信号测量通道的电压值。

通过电动阀门信号处理分析及特征量提取研究,进一步掌握电动阀门信号处理技术,通过提取电流有效值、峰值冲击电流、行程时间、声发射信号有效值、加速度级、冲击频度和加速度频域信号等故障敏感特征量,将这些特征量与初始值对比或进行长期趋势分析,能够有效掌握电动阀门的故障状况和故障趋势,对保障电动阀门健康运行具有重要作用。

5 案例分析

某核电站再热抽汽电动隔离阀,该阀门本体为VELAN生产的楔形闸阀,电动执行机构为美国LIMITORQUE公司生产,具体详细参数如表1所示。

表 1 阀门基本信息

电机 额定功率	行程 时间	电机 参数	额定/ 堵转电流
380 VAC 0.83 HP	63 s	AC400 V/50 Hz	1.75 A/14 A

该阀门在使用过程中,电气盘柜出现非正常触发盘柜故障,阀板拔出时伴随着较大声音,且出现阀板锤击阀杆的现象。通过对该阀门加装传感器测试,从采集的电流曲线分析,该阀门阀板拔出电流值为 3.21 A 明显偏大,相比额定电流明显增大,阀板拔出力 80 627 N 同样偏大,推断阀门处于卡滞故障运行状态;

在核电站大修期间对该阀门进行拆卸解体,发现该阀门阀板经长期运行密封面出现不平整现象,通过分析后对该阀板阀座采取了研磨处理,表面明显较之前光滑平整,如图 7 所示。

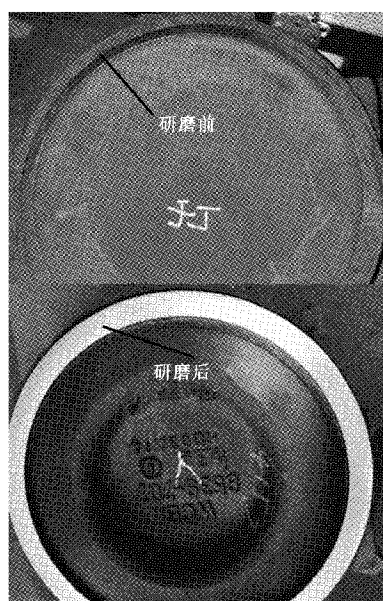


图 7 阀板密封面研磨前后对比

阀门解体研磨后测得阀板拔出电流降至 1.75 A,阀板拔出力降至 29 210 N,电流和阀板拔出力处于正常水平,阀门恢复正常运行。阀门解体前后的测试数据如表 2 所示。

表 2 阀板解体研磨前后数据表

项目	解体前	解体后
电机尖峰电流/A	12.52/11.61	12.80/12.98
阀板拔出电流/A	3.21	1.75
阀板拔出力/N	80 627	29 120
关力矩动作值/N	123 891	105 431
开/关运行电流/A	1.06/1.03	1.17/1.14
最终入座力/N	130 183	116 524
最大入座功率/W	3 904.18	3 608.60

通过对阀板密封面的研磨处理最终使得阀门功能正常运行,阀板拔出电流值和阀板拔出力恢复到正常运行数值,阀门运行良好。处理后给该阀门设定了一个合理的阀板拔出电流阈值,当测试拔出电流超过该阈值,就执行阀板与阀座研磨工作,在后续的使用中也充分验证该电流阈值对阀门检修起到了很大的帮助。此项测试也充分验证了阀门的运行电流值能够表征阀门的故障状态。

6 结 论

本文在分析电动阀门结构和动作原理的基础上,通过电动阀门故障特征的分析,对电动阀门信号获取的探测方法、信号处理方法和特征量提取方法进行了研究,掌握了电动阀门信号分析处理技术和故障特征量提取技术,结合实际的电动阀门运行状态数据测试,充分验证获得的特征量能够代表电动阀门运行状态和故障信息,为电动阀门故障诊断和故障趋势分析奠定了技术基础。

参考文献

- [1] 徐猛,王宗学,吴云洁.一种新型智能设备及其远程故障诊断技术研究[J].计算机仿真,2004(2):98-101,34.
- [2] 张兴法.核电阀门国产化研究[J].中国核电,2011,4(2):138-145.
- [3] 陈林,王兴松,张逸芳,等.阀门故障诊断技术综述[J].流体机械,2015,43(9):36-42.
- [4] 杨垦,舒芝锋,黄萍,等.核电厂阀门检测用推力传感器的设计与研究[J].化工自动化及仪表,2019,46(12):1032-1034.
- [5] 胡海波. AES-91 核电机组电动闸阀诊断测试技术的分析与研究[D].保定:华北电力大学,2016.
- [6] 王秋平,孙亮,关济实,等.基于模糊聚类的安全级电动阀故障诊断研究[J].电测与仪表,2014,51(1):30-34.
- [7] 谭术洋,李毅,关莉.核级阀门故障分析及可靠性改进[C].中国核学会,2014:235-237.
- [8] 黄燕,周密,黄卫星,等.阀门故障分析及其分类[J].阀门,2007(6):41-44.
- [9] 杨晶,李录平,饶洪德,等.基于声发射检测的阀门泄漏故障模式诊断技术研究[J].动力工程学报,2013,33(6):455-460,483.
- [10] 蒋爱国,符培伦,谷明,等.基于多模态堆叠自动编码器的感应电机故障诊断[J].电子测量与仪器学报,2018,32(8):17-23.
- [11] 陆占兵,张大发,李凤宇,等.电动阀故障检测诊断研究[J].海军工程大学学报,2004(6):74-77.
- [12] 李让.矿用隔爆型电动阀门运行状态在线检测系统设计[J].电工材料,2018(3):32-34.
- [13] 张颖.阀门气体内漏的声学特性及量化检测技术研究[D].大庆:大庆石油学院,2007.
- [14] 高倩霞,李录平,饶洪德,等.阀门泄漏率的声发射测定

技术研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(1): 42-46.

- [15] 杨品, 李录平, 饶洪德, 等. 基于声发射检测的阀门泄漏故障模式诊断技术研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(6): 455-460, 483.

- [16] 杨国峰, 胡守印. 模式识别技术在安全级电动阀故障诊

断中的应用[J]. 核动力工程, 2010, 31(1): 79-82, 87.

作者简介

曾杰, 助理研究员, 硕士, 主要从事反应堆故障诊断技术研究和核电产品项目管理。

E-mail: 1009734051@qq.com