

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.009

# 核电阀门性能测试及维修决策支持系统设计

李佳亮,许湘莲\*

(武汉理工大学 自动化学院,湖北 武汉 430070)

**摘要:**针对核电阀门调试与维护工作对人力资源的过度占用及其经济性较差等问题,以核电电动闸阀为典型,研究了阀门的自动化性能测试问题。拟定了其测试方案,并探讨了阀门电机定子电流、阀杆推力等关键指标的监测方法;同时,考虑指标稳定性因素,改进了传统优度评价法,用于区间型性能测试结果分析;基于上述研究,构建了阀门的性能分析与维修决策模型,设计了以 ARM Cortex-M4 为硬件采控模块内核,以 C/S (Client/Server) 为人机交互端软件架构的应用系统,并进行了测试。研究表明:该系统能实现调试辅助、自动化性能测试及维修决策支持等功能,有助于提高核电阀门测试效率,优化维护结构。

**关键词:**核电阀门;自动化性能测试;优度评价法改进;维修决策;ARM;系统设计

中图分类号:TH17;TP23

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0819-06

## Nuclear valves' performance test and maintenance decision-making support system

LI Jia-liang, XU Xiang-lian

(School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of over-occupation of human resources and poor economic efficiency of valves' commissioning and maintenance in nuclear power plant, an automated performance test method of valves was studied with the nuclear electric gate valve as a typical example. The test scheme was enacted, and the monitoring methods of the key index such as the stator current of the valve motor and the stem thrust were discussed. Considering the stability of the index, the traditional superiority evaluation method was improved for the analysis of interval performance test results. Based on the research above, the performance analysis and maintenance decision-making model of the valves was constructed. The application system, ARM Cortex-M4 as the core of the hardware control module and the C/S (Client/Server) mode as the human-computer interaction software architecture, was designed and tested. The results indicate that the system can realize debugging assistance, automated performance testing and maintenance decision support. It helps to improve the efficiency of valves' testing and optimize its maintenance structure.

**Key words:** nuclear valves; automated performance test method; improved superiority evaluation method; maintenance decision-making; ARM; design of system

## 0 引言

核电阀门主要指在核电站机组及其辅助机构关键位置中承担介质调节功能的一类重要阀门,其工作状态的稳定性直接关系到电站的安全与稳定<sup>[1-3]</sup>。据统

计,一座包含两台百万千瓦机组的核电站每年用于阀门的维护费用高达上亿元,占电站总维护费用的近50%<sup>[4]</sup>。因此,针对电站阀门的自动化调试、性能测试方法与工具,以及维护策略的优化需求迫切。目前国内外已有的相关设备,例如 Crane Nuclear 的 VOTES

收稿日期:2019-10-22

作者简介:李佳亮(1993-),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,主要从事机电应用及自动化测控方面的研究。E-mail:xxlrcyd0@163.com

通信联系人:许湘莲,女,副教授,硕士生导师。E-mail:xuxianglian@163.com

INFINITY, Teledyne 的 QuikLook 等<sup>[5]</sup>, 都具备一定的阀门测试与诊断的功能, 但此类设备只适用于少数进口阀门, 或需解体试验, 且都缺乏以可靠性为中心的维修理念下对阀门故障前性能状况的关注<sup>[6-7]</sup>, 故无法对其维修决策起到指导作用以提高工作效率与节约成本。

本文从阀门自动化测试方法及其性能结果分析两方面展开研究, 以指导阀门的维护工作。

## 1 阀门性能测试关键问题

阀门性能测试的目标是将阀门当前性能转化为数据, 主要任务为性能指标的提取及其测量方案的拟定。

### 1.1 性能测试方案研究

本文将核电电动闸阀为典型展开研究。电动闸阀由三相电机驱动阀杆推动阀座中闸板, 并在限位开关组的辅助下控制阀门开度以进行流体调节。

结合实际情况确定该电动闸阀性能指标系统如表 1 所示。

表 1 电动闸阀性能指标系统

指标类别	电气机构	机械结构	调试参数
子指标	峰值电流 (c1)	阀杆拔出力 (c3) “力矩关”开关触	限位开关动作值 (c7)
	运行电流 (c2)	阀杆插入力 (c5) 阀杆摩擦力 (c6)	

阀门性能测试系统需要模拟阀门的真实工况, 给出实时激励信号, 并监测、存储实时指标数据。

本文拟定电动闸阀测试方案时序图如图 1 所示。

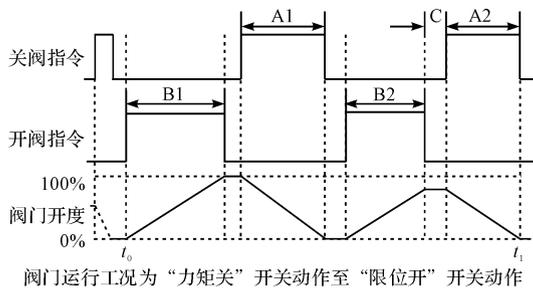


图 1 电动闸阀测试方案时序图

则在一次性能测试最小周期  $T$  ( $T = t_1 - t_0$ ) 中, 阀门电机以图 1 中控制逻辑进行阀门开度的控制。A1、B1 段阀杆总行程为机械行程, A2、B2 段总行程为其电气行程, 其与前者的比值即指标 C7, 它指示调校后的阀门工作行程的规范程度。其中, 运行电流即电机定子电流, 其最大值为峰值电流。阀杆的各推力指标为阀杆处于关键位置的拉伸或压缩力, 指示阀门的机械结构是否正常, 滑动机构密封是否良好等。

## 1.2 参数监测方案

本文需研究的监测参数为电机定子电流、电压等电气量与阀杆位移、气缸气压、阀杆推力等物理量。其中, 电动阀的定子电流特征为测试行程中段平稳, 始末端变化剧烈, 所以可对端点电流峰值进行有效监测, 同时减少中间行程的数据量。综合考量精度、成本与灵活性<sup>[8]</sup>, 本研究采用 ADS8698 搭配 ARM 处理器的方案。阀门运行时其余物理量皆可借助高精度变送器直接转化为 4 mA ~ 20 mA 的标准信号进行测量。

交/直流采集前端电路如图 2 所示。

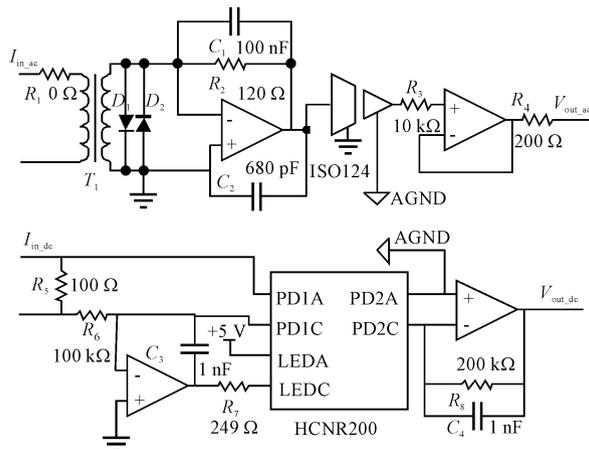


图 2 交/直流采集前端电路

其中, 钳式互感器  $T_1$  可将 60 A 额定交流 ( $I_{in\_ac}$ ) 转化为  $\pm 16.97$  mA 小信号, 并由 100 PPM 采样电阻  $R_2$  转化为  $\pm 2.036$  V 后经 ISO124 隔离输出, 其中 ADC 采样通道电压配置为  $\pm 2.56$  V。而额定 400 V 电压测量时取  $R_1 = 600$  k $\Omega$ ,  $R_2 = 2.5$  k $\Omega$ ,  $C_1 = 5.6$  nF。直流输入电流 ( $I_{in\_ac}$ ) 经线性光耦 HCSR200 隔离并最终转化为 0.8 V ~ 4 V 的电压信号进行测量, 其中, ADC 通道电压配置为 0 ~ 5.12 V。

采集获取的交流瞬时值  $i_k$ 、 $u_k$  依据真有效值均方根法进行实时有效值运算<sup>[9]</sup>, 如下式所示:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} i_k^2}, U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} u_k^2} \quad (1)$$

式中:  $N$ — 信号整周期采样点数, 由误差分析理论上其精度达到 0.2 级精度误差取 60 以上为宜<sup>[10]</sup>。

阀杆受力测量是关键问题之一, 由于应变片安装中表面磨平、上胶等工序费时且存在阀杆损坏风险。本文采用一种间接测量法, 通过径向形变获取轴向力<sup>[11]</sup>, 即:

$$F = \frac{\varepsilon}{\nu} \times E \times \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (2)$$

式中:  $F$ — 阀杆受力;  $\varepsilon$ — 轴向应变变量;  $\nu$ — 泊松比;

$E$ —材料的杨氏模量; $D$ —阀杆直径。

相关材料系数可由工程资料与结构试验获得,采用微米位移传感器可以测得  $\varepsilon$ 。

电动闸阀结构及阀杆测力装置安装示意图如图3所示。

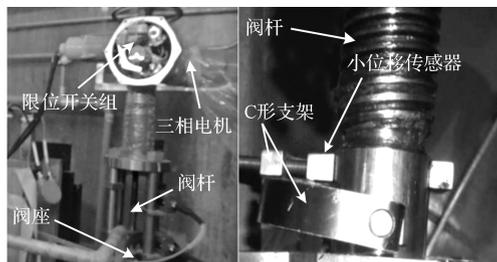


图3 电动闸阀结构及阀杆测力装置安装示意图

此外,如果出现阀门的阀杆包裹于阀体内部的情况则可以采用 MMC 法借由电机定子电流对推力进行估计<sup>[12]</sup>。

## 2 阀门性能分析及维修决策模型

由前文所述并结合工程实际可知:(1) 阀门单次测试过程中,多项运行指标小幅浮动,即其运行过程实际表现为区间,如运行电流、阀杆推力等;(2) 各运行指标处于特殊位置时的特征值在同一时间的几次测试结果中也会存在一定差距,如阀杆插入力、拔出力等,这是由于仪器基础误差、测试原理,以及阀门运行工况中的不确定性振动等多种复杂因素所致。

以上情况若对测试结果取数值平均后进行分析,将会损失区间值中包含的状态信息,即指标的稳定性因素,而使分析结论不够严谨。

### 2.1 优度评价法改进

优度评价法在对研究对象指标矛盾性的处理、样本数量依赖度及实用性等方面都有优势<sup>[13]</sup>。针对文中阀门性能测试结果的分析评估需求,文中研究指标取值为区间的改进优度评价方法,其基本步骤为:

(1) 将研究对象  $R$  抽象为物元模型:

$$R = (N, C_n, V_n) \quad (3)$$

式中: $N$ —对象名称; $C_n$ —对象  $n$  个指标; $V_n$ —指标取值区间。

并分别确定其  $n$  个指标各自的节域  $V_p = (v_{pa}, v_{pb})$  与经典域  $V_j = (v_{ja}, v_{jb})$ ,  $V_j \in V_p$ 。经典域表征指标的在各个评价等级中的取值范围,节域表征其发生质变的边界。

(2) 构造关联函数。按照可拓学定义<sup>[14]</sup>,实数域中点  $x_0$  与区间  $X_0 = (a, b)$  的“距”为:

$$d(x_0, X_0) = \left| x_0 - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (4)$$

则区间与区间“距”可以定义为:

$$d[(x, y), (a, b)] = (\min\{d[(x, (a, b))], d[(y, (a, b))]\}, \max\{d[(x, (a, b))], d[(y, (a, b))]\}) \quad (5)$$

另设  $X_1 = (a, b)$ ,  $X_2 = (c, d)$ , 且  $X_1 \subset X_2$ , 定义点  $x$  关于区间  $X_1$  和  $X_2$  的位值  $D(x, X_1, X_2)$  为:

$$D[(x, y), X_1, X_2] = \begin{cases} -1, & \text{iff } (x, y) \subset (a, b) \\ d[(x, y), X_2] - d[(x, y), X_1] \end{cases} \quad (6)$$

由此可将初等关联函数构造如下: $x_s$  记为区间  $X_1$  和  $X_2$  的公共端点,则对任意点  $x \neq x_s$ , 区间  $(x, y)$  关于区间  $X_1$  与  $X_2$  的关联函数如下式所示:

$$K[(x, y), X_1, X_2] = \frac{d[(x, y), X_1]}{D[(x, y), X_1, X_2]} \quad (7)$$

其中区间四则运算参照文献[12]。

关联函数的性质表明其值越大,则物元指标与其节域、经典域组成的区间结构的关联程度越高。

(3) 指标权重分配与优度值计算。首先利用层次分析法(AHP)根据电站阀门运行特点<sup>[15]</sup>,结合专家主观意见,建立指标判断矩阵,最终得出主观权重向量  $w'$ ;其次,由指标重要性相关法(CRITIC)分析不同状态下历史数据中包含多指标变化的相关度信息<sup>[16]</sup>,获得客观权重向量  $w''$ 。两种常用权重分配方法的见文献[13-14]。由此定义综合权重  $w$  及优度  $C(R)$  计算式如下式所示:

$$w_j = \frac{w'_j w''_j}{\sum_{j=1}^n w'_j w''_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n);$$

$$C(R) = \sum_{j=1}^n w_j K_j = (c - \delta, c + \delta) \quad (8)$$

式中: $K_j$ —指标  $j$  关于某经典域的关联函数值; $c$ —优度区间中点; $\delta$ —优度区间半径。

$C(R)$  所处的区间值总体越大则物元  $R$  隶属于该经典域的程度越高。由于优度为区间,其优劣判定需要结合实际情况。考虑到优度的  $\delta$  表征各指标的总体稳定性,中点  $c$  表征总体优度,该系统在其精度前提下对于优度  $A(c_1 - \delta_1, c_1 + \delta_1)$ 、 $B(c_2 - \delta_2, c_2 + \delta_2)$ , 且  $\delta_1 \geq \delta_2$  时判定方案为:(1) 若  $c_2 \geq c_1$ , 判定  $B$  优;(2) 若  $c_2 < c_1$ , 则满足  $c_2 + \delta_2 > c_1$ ,  $c_2 - \delta_2 > c_1 - \delta_1$  时判定  $B$  优, 否则  $A$  优。

### 2.2 阀门性能分析模型构建

RCM 旨在将预防性维护作为早期故障排查,提高效率并节约成本的一种维修策略。基于优度评价模型的阀门性能分析及维修决策模型如图4所示。

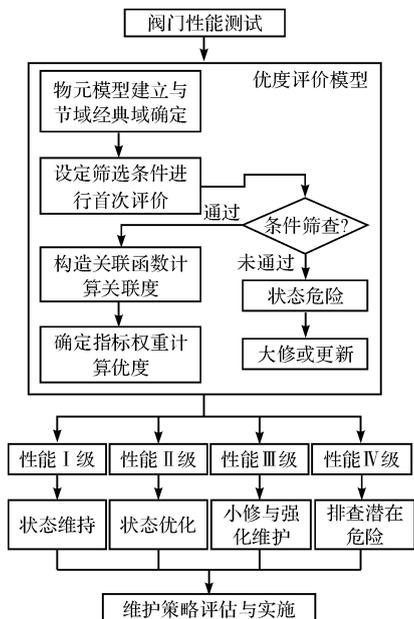


图 4 阀门性能分析及维修决策模型

本文依据阀门测试系统获得的初始性能参数进行首次评价,对某些必须满足的条件进行筛选。将阀门的性能分为 4 个等级,即 I 级:状态极佳,可适当延长维

护时间,优化维护方案;II 级:阀门状态次佳,需保持维护力度,或适当调整;III 级:性能一般,阀门可能有多项指标偏离最佳值,处于较敏感状态,需强化维护,对其密切关注;IV 级:性能较差,有某项或者多项关键指标已经接近故障的临界值,需要立即关注高危指标,排查潜在故障,并定期测试复查。

例如当前某电动闸阀的某次性能测试结果以物元形式表示,即:

$$R = \left[ \begin{array}{l} \text{开关闭 #1} \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \end{array} \begin{array}{l} (35.01, 35.23)/A \\ (7.56, 7.64)/A \\ (60.14, 62.74)/kN \\ (67.93, 70.97)/kN \\ (138.49, 145.75)/kN \\ (11.428, 11.612)/kN \\ (92.79, 92.81)/(%) \end{array} \right] \quad (9)$$

本文基于工程数据与专家意见将物元的经典域评价体系确定如表 2 所示。

表 2 物元的经典域评价体系

指标 / 单位	典型值	经典域 I	经典域 II	经典域 III	经典域 IV
$c_1/A$	34.75	(0, 0.75)	(0.75, 1.5)	(1.5, 2.25)	(2.25, 3)
$c_2/A$	6.8	(0, 0.287)	(0.287, 0.575)	(0.575, 0.862)	(0.862, 1.15)
$c_3/kN$	56.23	(0, 3.75)	(3.75, 7.5)	(7.5, 11.25)	(11.25, 15)
$c_4/kN$	63.87	(0, 5)	(5, 10)	(10, 15)	(15, 20)
$c_5/kN$	129.54	(0, 8.75)	(8.75, 17.5)	(17.5, 26.25)	(26.5, 35)
$c_6/kN$	9.68	(0, 0.75)	(0.75, 1.5)	(1.5, 2.25)	(2.25, 3)
$c_7/(%)$	95	(0, 0.75)	(0.75, 1.5)	(1.5, 2.25)	(2.25, 3)

表 2 中,经典域数值区间表示为基于典型值的误差绝对值,则各指标节域可取为各经典域的并集。若设  $(a_0, b_0)$  为物元的原始指标取值或指标经典域区间,  $(M_c, M_d)$  为对应的节域,  $i$  为经典域等级的数目(文中取  $i = 4$ ) 构造式将物元及经典域进行去量纲与规范化

处理如下:

$$(a, b) = \left( i \frac{a_0 - M_c}{M_d - M_c}, i \frac{b_0 - M_c}{M_d - M_c} \right) \quad (10)$$

数据规范化处理,并依据公式(3 ~ 7) 可计算出物元的指标关联值计算结果如表 3 所示。

表 3 物元的指标关联值计算结果

指标	关联值 I	关联值 II	关联值 III	关联值 IV
$c_1$	(0.346, 0.36)	(-0.654, -0.36)	(-1.488, -0.02)	(-0.885, -0.787)
$c_2$	(-0.641, -0.574)	(-0.46, -0.332)	(0.078, 0.36)	(-0.249, -0.055)
$c_3$	(-0.413, -0.025)	(0.073, 0.295)	(-0.478, -0.13)	(-0.653, -0.421)
$c_4$	(-0.341, 0.153)	(-0.188, 0.42)	(-0.594, -0.29)	(-0.729, -0.527)
$c_5$	(-0.454, -0.012)	(0.023, 0.147)	(-0.488, -0.07)	(-0.659, -0.383)
$c_6$	(-0.526, -0.444)	(-0.288, -0.166)	(0.331, 0.42)	(-0.319, -0.203)
$c_7$	(-0.649, -0.639)	(-0.474, -0.46)	(0.053, 0.08)	(-0.071, -0.047)
优度	(-0.411 4, -0.142 8)	(-0.229 8, 0.043 8)	(-0.278 8, 0.056 7)	(-0.534 8, -0.356)

指标权重计算过程在此直接给出:  $w' = (0.077 5, 0.131 0, 0.187 3, 0.137 5, 0.134 8, 0.121 3, 0.184 4, 0.094 2, 0.124 8, 0.289 5, 0.158 3, 0.216 8, 0.038 9)$ ;  $w'' = (0.103 7)$ ; 则由综合权重公式(8) 可以计算得出:  $w =$

(0.063 89,0.119 9,0.116 6,0.265 1,0.130 5, 0.271 6, 0.027 4)。

由前文所述分析结果可以判定经典域 II 为最优域,则依据模型认为目标阀门性能状态次佳,需要采取维修策略为:保持当前的维护力度,或者适当调整以优化保持稳定运行状态。

### 3 系统设计与结果分析

阀门性能测试及维修决策支持系统可进行阀门辅助调试,并实现全流程自动化性能测试及分析。

系统总体设计框图如图 5 所示。

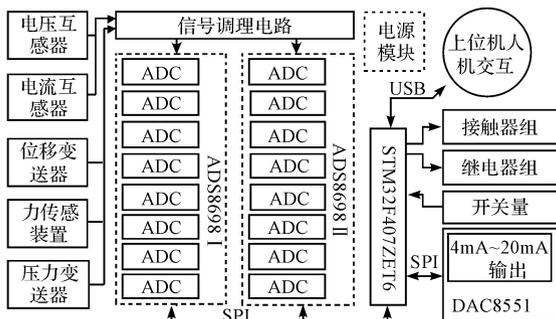


图 5 系统总体设计框图

采控模块中,ADS8698 I 负责交流采集;ADS8698 II 实现 4 mA ~ 20 mA 直流采集。测试结果显示:系统交流监测精度可以达到 0.5 级,直流监测精度可达 0.2%。ARM 主控通过 USB 和上位机进行操作指令与流程数据的实时通讯,并通过继电器组与光耦实现开关信号的输出与采集,电机激励电流由接触器组控制。模拟量输出模块配置 DAC8551 作为高精度(0.1%)的 4 mA ~ 20 mA 标准信号输出,以提供例如智能式电动阀测试中定位器电流等激励信号的输出。

主程序及外部中断程序逻辑流程图如图 6 所示。

图 6 中,ARM 与上位机通讯采取类 Modbus 协议。依前文分析知:可按阀门工况设定阈值调整数据上送速率,如电动闸阀的阀位超出 2% ~ 98% 的阈值时,将数据上送频率提高为 1 kHz,以确保监测能力并减轻数据库压力。外部中断基于 ARM 边沿捕获实现频率采集提高交流检测精度。上位机人机交互客户端软件采用 C/S (Client/Server) 架构以增强信息安全与稳定性,客户端提供阀门调试辅助控制命令下发、阀门性能测试与分析的流程展示,过程数据的实时显示,以及核

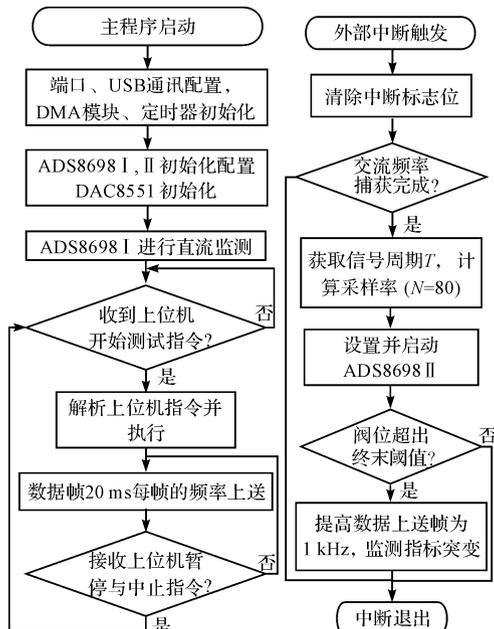


图 6 主程序及外部中断程序逻辑流程图

电规范试验报表生成等功能。

依照测试规范对“开关阀#001”开展性能测试,通过阀门性能测试过程界面可跟踪测试流程进度,并由实时指标波形监测、判断其性能状态有无异常信息。测试流程结束后,系统将测试结果及维修决策建议以报表形式生成,供专业人员参考。

### 4 结束语

笔者以核电站电动闸阀为例,研究了其指标系统及关键参数监测方法,阐述了阀门的自动化性能测试方案;通过分析得出了以区间值型多指标系统表征核电阀门更为合理的结论,并提出了一种区间值型改进优度评价方法;最后,构建了性能分析及维修决策模型,并完成了系统设计与实施。

测试结果分析表明:该应用系统具有实用可靠、便携高效的特点。

### 参考文献 (References):

- [1] 孙 丽,陈立龙.我国阀门行业现状与发展趋势[J].机电工程,2009,26(10):103-104.
- [2] 周 涛,冉 刻,刘梦影,等.核电站和普通电站阀门标准的比较研究[J].华电技术,2010,32(11):18-23.

(下转第 829 页)

本文引用格式:

李佳亮,许湘莲.核电阀门性能测试及维修决策支持系统设计[J].机电工程,2019,36(8):819-823,829.

LI Jia-liang, XU Xiang-lian. Nuclear valves' performance test and maintenance decision-making support system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(8):819-823,829.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>