

# ROTORK型电动执行器主板动态检测与故障分析

赵欣欣

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

**摘要：**ROTORK型电动执行器因其功能丰富、控制便捷，故广泛应用于核电、化工等领域阀门智能驱动，其主板是核心控制单元。现场工况复杂，长期受温湿度交替影响，可能产生通讯中断、逻辑错乱、阀位反馈偏差等隐性故障。立足核电预防性检修需求，本文研发六仓室一体化动态检测平台，搭建1:1仿真平台，内置可编辑电机，依托数字量、模拟量双通道采集、FPGA高速时序存储与规则推理研判体系，开展全行程动态检测试验。通过批量实测数据划分电源、阀位采集、逻辑运算、通讯四类故障机理，形成标准化检测作业流程。现场应用证实装置单日可完成300次全功能动态循环测试，故障识别准确率99%，能够提前排查潜在隐患，强化核电设备安全预控能力。

**关键词：**ROTORK电动执行器；主板动态检测；故障特征分析；运维优化

引言：主控主板负责指令传输、阀位采集、报警与电机驱动，运行可靠性直接决定机组安全运行。当前主流整机单套静态检测手段无法模拟阀门动态换向工况，仅能识别短路、无输出等显性故障，电容衰减、时序偏移等隐蔽缺陷极易遗留，存在停机安全隐患。借鉴答题卡自动比对检测思路，本文设计并行六仓动态检测设备，完整介绍硬件布局、软件架构与故障推理算法，结合实测数据归纳主板各类故障特征，制定标准化检测与维修处置方案，为核电仪控板件提前消缺、优化预防性运维提供可行技术路径。

## 1 ROTORK 执行器主板静态检测的固有局限

### 1.1 主板硬件组成与工作机理

ROTORK主控主板为高密度集成PCB板，配套电源板、计数器板、继电器板协同工作，核心功能模块分为五类：命令输入模块接收4-20mA模拟量、数字开关量及ESD脉冲信号；逻辑运算单元完成开/关/停命令优先级判断与联锁校验；阀位采集模块读取霍尔、干簧管信号并输出4-20mA阀位反馈；驱动控制模块输出信号控制电机正反转，采集力矩与超温报警；通讯存储模块记录动作时序与故障代码，通过总线与人机界面交互。主板工作依赖稳定多通道信号时序，静态通电仅验证基础供电通路，缺少往复换向动态载荷，无法复现现场交变工况下元器件劣化失效过程，是传统检测的核心短板。

### 1.2 现有两类检测方案对比

当前核电检修现场存在整机嵌入式与静态通电柜两种检测手段，均无法同步满足多板件容纳与动态循环测试双重需求。整机嵌入式单次仅接入1套主板，依靠人工触发动作，单日动态测试仅20次，虽可模拟运动工况但效率极低；静态通电柜可同时放置6套主板，但无电机

驱动单元，全程无换向动态动作，仅能完成静态通电核验，动态隐性故障完全无法识别。结合广核防城港、阳江电厂现场需求，明确核心改进目标：检测装置单批次容纳6套主板，单日全自动动态循环测试不少于300次，兼顾大容量与动态仿真能力。



图1 现有检测方案对比示意

### 1.3 传统检测模式核心痛点

第一，故障检出覆盖面不足，无动态换向工况，电解电容充放电、芯片时序漂移、继电器疲劳等隐性缺陷无法暴露，投运后频发阀位漂移与远程无响应故障；第二，检测效率低下，单套测试占用大量人力备件，大修周期内无法完成全部板件预检；第三，信号检测精度低，人工示波器单点采集无法完整留存多通道同步时序，故障溯源缺少数据支撑；第四，无标准化故障研判逻辑，依赖维修人员经验判断，易误判漏判，检修质量波动大；第五，无恒温恒湿配套，测试环境与核电现场工况差异大，无法复现潮湿温差引发的板件漏电故障<sup>[1]</sup>。

## 2 主板隐性故障物理机理与动态检测技术难点

### 2.1 四类隐性故障的物理成因与静态检测盲区

基于数十块现场故障主板的失效分析，将主板隐性故障归纳为四类。电源供电类故障：电解电容长期处于温湿度交变环境导致容量衰减，可能出现瞬时掉电、阀位跳变，静态检测完全无法检出。阀位反馈采集故障：

霍尔采集芯片引脚虚焊或氧化，动态往复换向中脉冲计数丢失，阀位反馈产生累积性漂移，静态无偏差显示。命令逻辑与报警失效故障：芯片引脚老化、继电器触点疲劳，多命令连续交替下发时逻辑时序紊乱，静态单条命令测试正常。通讯输出类故障：Modbus通讯模块阻抗漂移，动态电机电磁干扰下总线信号失真，静态无干扰时通讯正常。四类故障共同特征为静态正常、动态暴露，占投运后主板故障总量的76%。

2.2 动态检测面临的三重技术难点

难点一：多通道信号同步采集与时序关联。单套主板动态换向时同时输出多类信号，存在严格时序逻辑关系——命令下发后阀位反馈须在200ms内开始变化、500ms内到达目标位置。须以毫秒级分辨率同步采集全部138路通道，完整留存信号变化关键拐点。难点二：往复换向工况的饱和循环仿真。隐性故障须经多次连续换向才能暴露，单套主板至少需300次连续换向才能覆盖各类

隐性故障暴露周期。难点三：故障特征的模式识别与标准化判据。四类故障波形特征各异，且不同故障可能呈现相似表象，须建立标准时序波形库和规则推理算法，实现故障自动分类与精准定位，消除人工判读主观差异<sup>[2]</sup>。

2.3 技术难点对应的解决思路

针对多通道同步采集难点，要求装置具备不少于138路采集通道的同步采样能力，信号延迟控制在100ms以内，波形分辨率不低于5ms，采用模拟量与数字量双独立通道分离设计。针对饱和循环仿真难点，要求装置具备6套主板并行独立测试能力，单日循环测试次数不低于300次，设计六仓室并行独立驱动结构，每个仓室配置独立可调直流电机。针对故障模式识别难点，要求装置内置标准时序波形库，具备实时比对和自动分类能力，采用FPGA高速时序存储与规则推理算法，毫秒级识别逻辑异常与报警失效故障。

3 六仓室动态检测装置的设计与实现

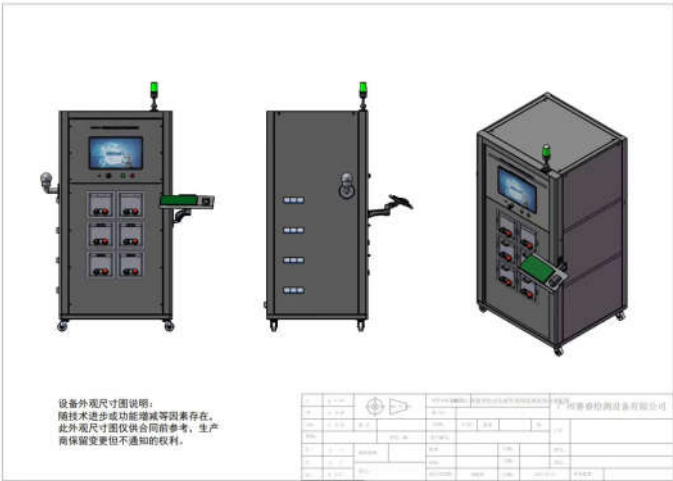


图2 六仓室动态检测装置整体架构

3.1 四层一体化总体架构

动态检测装置采用硬件仓室层—信号采集层—FPGA记录层—软件研判层四层架构，实现6套主板并行独立动态测试。硬件仓室层采用3行2列多侧均衡布局，每个仓室配置独立24-48rpm可调直流电机模拟阀门全行程动作，内置温湿度控制系统，激光位移测试晃动偏差仅8.5mm，单仓空间利用率67%。信号采集层搭载模拟量+数字量双独立模块，输出9路数字命令、2路4-20mA模拟量，同步采集10路数字反馈、2路模拟阀位信号，信号延迟73ms。FPGA记录层采用高速采集单元，仅存储信号阶跃关键点位，24小时存储量不超过1GB，波形采集分辨率5ms。软件研判层搭载规则推理算法，内置标准时序波形库，毫秒级识别逻辑异常与报警失效故障。

3.2 硬件系统关键模块实现

双路信号模块分离数字量与模拟量独立硬件通道，覆盖全部138路采集通道，信号延迟73ms。FPGA记录模块仅捕捉命令下发、反馈跳变、报警触发关键拐点，大幅降低存储占用，生成可视化时序曲线，支持单仓调取24小时数据。仓室采用透明旋钮门与独立航空插头，内置实验室级恒温恒湿模块，长时间待机自动维持仓内湿度，满足核电现场高湿环境下测试一致性要求。

柜体尺寸950×850×1850mm，集成一键运行操作界面，通过仓室空间结构，可显著增强EMC抗电磁干扰能力和检测效率。

3.3 软件系统控制逻辑与智能研判

软件基于WPF框架、MVVM多线程架构，采用

SQLite数据库与Modbus RS232总线实现PLC通讯,核心功能分为六大模块:一键自动运行模块打包24项测试内容;仓室独立控制模块支持6个仓室单独启停;多通道信号实时监测同步显示模拟量与数字电平状态;FPGA波形绘制模块自动生成时序曲线;规则推理故障报警模块内置标准时序数据库实时比对动作逻辑;数据统计报表模块自动汇总测试数据生成检测报告。规则推理算法将实时波形与标准波形逐项比对,任一参数超出阈值即判定故障,按优先级排序输出,引导维修人员精准定位故障元器件<sup>[3]</sup>。

#### 4 实施验证:典型故障识别与现场应用效果

##### 4.1 四类故障的动态检测识别特征

依托数百套主板实测数据,四类故障的动态检测识别特征如下。电源供电类故障:FPGA采集波形显示每次电机换向时刻模拟阀位4-20mA信号瞬时跌落,规则推理模块检测供电时序异常,判定电源回路隐性故障,占隐性故障约32%,维修方案为更换电解电容或整流二极管。阀位反馈采集故障:连续30次换向后反馈模拟量累计偏移超0.5mA,时序曲线脉冲点位缺失,占隐性故障约24%,维修方案为更换霍尔采集芯片或重焊板件接插件。命令逻辑与报警失效故障:一键全项测试并行下发多联锁命令时,报警信号延迟超10ms,规则推理判定时序故障,属核电高风险缺陷,占隐性故障约28%,维修方案为更换逻辑运算芯片或继电器。通讯输出类故障:多循环测试中通讯丢包率超1%,装置同步记录电磁干扰下波形畸变,占隐性故障约16%,维修方案为更换通讯模块或屏蔽加固。

##### 4.2 现场应用效果

以某核电大修检测任务为实例,同期对比传统整机检测与本动态装置两组方案:效率层面,传统方式单日仅完成6套主板20次动态测试,本装置同步6套各355次循环,检测效率提升17倍;故障检出层面,传统静态检测仅识别短路、无输出显性故障,漏检率42%,本装置四类隐性故障识别准确率99%,提前检出12块存在电容、时序缺陷主板,避免机组带隐患运行;人力成本层面,无需专人值守人工触发动作,单人即可完成全天批量检测;数据溯源层面,全流程时序波形自动存储,故障机理分析有据可查,维修返工率下降38%。

#### 5 标准化建设:检测流程与长效运维保障

##### 5.1 检测流程标准化文件编制

依托装置成熟应用经验,编制《ROTORK电动执行器主板动态检测作业指导书》,明确设备开机自检、板件接线、一键测试、故障复检、数据归档全流程操作步

骤,统一故障判定阈值、波形标准、报表输出格式。配套故障处置对照表,四类故障分别标注维修手段、更换备件、复检要求,实现不同检修人员操作标准统一,降低人为判断误差。

##### 5.2 装置运行安全管控

装置运行存在板件受潮、静电击穿、人员触电三类潜在风险,配套专项防控措施。防潮:每个仓室独立密封,内置恒温除湿单元,长时间待机自动维持仓内湿度。防静电:整机配置静电释放装置,拆装必须佩戴手环,仓门断电联锁。防触电:380V总回路配备高灵敏漏电保护器,带电开启仓门立即切断动力电源并声光报警。机械防护:电机驱动单元内置过载保护,卡滞工况自动停机<sup>[4]</sup>。

##### 5.3 设备长效维护与持续迭代

建立检测装置定期维保计划:每周校验模拟量、数字量输出精度,每月校准FPGA采集分辨率,每季度清洁仓室信号插头、除湿滤网。设立专项备件储备,备用PLC、直流电机、FPGA采集模块。定期组织检修人员开展装置操作与波形故障判读培训。每年结合新型ROTORK主板型号更新软件标准波形库,持续扩大检测适配范围。

#### 结束语

本文针对ROTORK执行器主板静态检测难以模拟真实工况、隐性隐患漏检严重、检测效率低下等突出问题,创新研制了六仓并行全自动动态检测设备,集成双通道信号采集、FPGA时序存储、规则推理故障识别一体化系统,可同步检测6套主板,单日完成300次饱和循环仿真。依托批量实测归纳了供电、阀位反馈、逻辑、通讯四类故障波形规律,构建了标准化检测处置流程。现场应用验证了设备检测效率与故障识别精度显著提升,可提前消除核电仪控隐性缺陷。后续将迭代多型号兼容算法,拓展在线联动监测功能,完善核电执行器全周期预防性检修数字化检测体系。

#### 参考文献

- [1]杨卫东.Rotork二代电动执行器典型故障分析与处理方法[J].设备管理与维修,2023(19):106-108.
- [2]徐明东.Rotork电动执行器板件深度解析和故障维护[J].机电信息,2021(25):62-64.
- [3]吴树轩,刘利剑.基于刚柔耦合的电动执行器箱体静力学分析[J].机械工程与自动化,2026,55(3):69-71,74.
- [4]朱小杰,刘杰,喻文新,等.电动执行器研究现状与展望[J].自动化仪表,2025,46(11):136-141.