

# 自动化测试技术在核电DCS测试中的创新应用

Innovative Application of Automated Testing Technology in Nuclear Power DCS Testing

★ 北京广利核系统工程有限公司 张旭

**摘要：**DCS作为核电站的神经中枢，其产品质量直接影响核电厂的安全稳定运行，严格的出厂前测试是DCS设备质量控制的重要一环。测试过程中大量的人工手动操作，会带来人因错误的风险，从而影响最终交付产品的质量。基于自动测试系统，可以提高测试自动化和标准化，减少人工操作，规范人员行为，有效减小人因问题对测试质量的影响。本文介绍了自动化测试技术在核电DCS测试中的创新应用，从人员可靠度分析了相关技术对产品质量的提升和核安全文化建设所起到的积极作用。相关技术已在CPR1000、高温气冷堆、华龙一号等多种堆型的核电DCS系统测试中得到了应用，有效减少了人因问题，为核电仪控领域的质量提升提供了可供借鉴的经验。

**关键词：**DCS系统；自动化测试；核电；测试工具；测试技术；仪控系统

**Abstract:** As the nerve center of a nuclear power plant, the quality of its products directly affects the safe and stable operation of the nuclear power plant. Strict factory testing is an important part of the quality control of DCS. A large number of manual operations in the testing process will bring risks of human error, affecting the quality of the final delivered product. Based on the automatic test system, it can improve test automation and standardization, reduce manual operations, standardize personnel behavior, and effectively reduce the impact of human factors on test quality. This article introduces the innovative application of automated testing technology in nuclear power DCS testing, and analyzes the positive effects of related technologies on the improvement of product quality and the construction of nuclear safety culture from the perspective of personnel reliability analysis. The technologies have been applied in the testing of nuclear power DCS systems of various reactor types such as CPR1000, HTR, HPR1000 and so on. Human factors problems have been significantly reduced, experience can be referenced in the quality improvement in the field of nuclear power instrumentation and control.

**Key words:** DCS system; Automatic test; Nuclear power plant; Test device; Test technology; I&C system

## 1 引言

在进行DCS系统的测试过程中，为了对DCS系统的I/O信号精度、逻辑功能、系统性能等进行测试，通

常需要借助仪器仪表或计算机网络设备，向被测对象输入电信号、网络通信信号、机械操作等激励信号，观测DCS反馈信号的变化，并将这个过程记录下来形成测试报告。以人工操作为主、仪器仪表为辅的测试方法，效率低下，同时易引入人因错误，已经难以满足大规模DCS系统的测试需要。技术方法的改进，是解决这一问题的途径之一。

采用自动化测试技术，由计算机替代人工手动工作，尽可能减少手动操作、读取、记录等人员行为，可以有效地减小人因问题对测试质量的影响，达到提高测试质量的目的。自动化测试系统，由计算机、仪器仪表和通信网络构成的大规模自动化测试系统，可以针对大规模的DCS系统，进行自动化的测试激励注入、测试过程监测和测试结果回收。另外，测试活动的规范化、标准化，是自动化发展的基础，也是从根本上提升质量的基础。基于自动化测试系统，必须将测试活动的先决条件、执行过程、数据记录等进行标准化，有利于引导人员严格按照规范的程序完成测试操作，强化照章办事的工作习惯，自动化测试技术的发展将有利于测试活动的标准化与规范化的提升。

自动化测试技术推广应用，减少了人因问题对测试质量的影响，帮助人员养成按照规范操作的工作习惯，为测试质量的持续提升提供保障。相关技术已经在国内多台套核电机组DCS系统测试中，得到了应用，积累了经验和成果，提升了核电DCS系统的出厂质量，为核电仪控领域的质量提升提供了可供借鉴的经验。与此同时，在自动化测试方面加大研发投入，鼓励人员通过科研创新持续改进，有利于构建学习型组织，营造良好的核安全文化氛围。

## 2 自动化测试系统

### 2.1 DCS系统测试基本模型

随着我国华龙一号堆型的建设，新一代核电机组大规模应用数字化控制系统、单堆机组DCS规模也在快速增大。对于规模庞大的DCS系统，其测试用例规模可达到数十万条。如采用完全人工操作传统仪器仪表进行手动测试，效率极其低下，且容易造成人因失误而引入缺陷，无法满足核电DCS高质量的测试要求。

DCS系统测试过程，可归纳为如下的标准测试过程：

- (1) 向被测对象发送测试激励，测试激励通常为电气信号、网络数据和人工操作等；
- (2) 回收被测对象的测试反馈，通常包括电气信号、网络数据和视听感官等；
- (3) 在测试的过程中，对被测对象进行实时监控，例如电压、电流、CPU负载、内存占用、系统日志等。

DCS系统测试基本模型如图1所示。

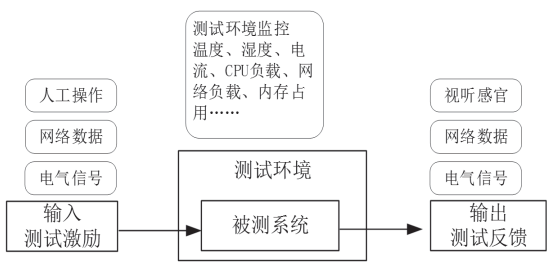


图1 DCS系统测试基本模型

其中，电气信号可以基于虚拟仪器技术，进行信号发生和采集。网络数据可以通过计算机通信技术，进行发送和接收。对于人工操作和视听感官，可以通过将其转化为电信号，进行采集或发生；也可以采用机器人、机器视觉、声音识别等技术方式实现。

### 2.2 自动化测试系统架构及功能

对于上述模型，通过基于虚拟仪器的自动化测试系统，可以很好地帮助测试人员，自动完成测试激励的发送、测试反馈的回收和测试过程的监控的过程。自动化测试系统的基本架构如图2所示。

I/O模块：用于实现与被测系统之间电气信号的交互。

通信模块：用于实现与被测系统之间网络数据的

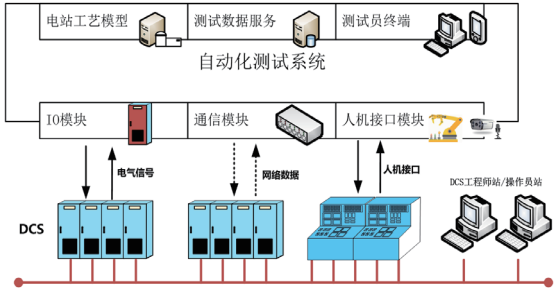


图2 自动化测试系统架构

交互。

测试数据服务：用于对测试的数据进行存储、对测试系统进行管理配置。

测试员终端：用于测试系统与测试人员之间进行人机交互。

电站工艺模型：通过计算机实现电站工艺过程仿真，用于仿真环境下的系统调试。

人机接口模块：机械手臂进行按钮、触控等相关机械操作；摄像头、麦克风进行包括指示灯颜色状态、仪表数据、视听警报等试听信号的采集。

自动化测试系统，已实现电气信号、网络数据的模拟与采集，测试过程的监控，测试结果的自动记录。基于自动化测试系统开展的测试活动，通过计算机技术、通信技术和信号采集技术，实现测试激励发出、测试反馈采集和测试环境监控的自动化，减少了人员操作强度。

自动化测试系统在设计上充分考虑了其可扩展性。在国内某电厂DCS升级改造中，测试人员将电厂工艺模型仿真机接入了自动化测试系统中，实现了控制系统、被控系统之间的完整闭环，在DCS制造厂家的工厂内就可以进行核电现场的调试工作。另外，自动化测试系统还可以接入机械手臂、摄像头、麦克风等设备，实现人工操作的模拟和视听感官的识别。

## 3 人工测试与自动化测试

### 3.1 测试中的人员行为分析

以DCS系统测试中的一个最常见的测试项，AI通道精度测试为例，对测试过程中的人员行为进行分析。

AI通道精度测试，人工测试的方法通常由两名测

试人员协同完成工作：

- (1) 甲阅读测试用例，将所要进行的接线操作通知乙；
- (2) 乙接收到操作指令，查找接线位置，完成接线操作；
- (3) 甲阅读测试用例，根据用例中指定的信号类型（mA或V）、信号数值，对测试仪表进行操作；
- (4) 甲阅读测试用例，通过工程师计算机查看DCS控制器中的变量值，记录数值。

在上述操作过程中，所涉及到的人员行为包括：阅读测试用例、响应操作指令、操作仪表、操作工程师计算机、读取数据、记录结果等。

通过通道测试自动化工具，可以大幅度简化上述过程。

仍然以AI通道精度测试为例，使用自动化测试工具的测试过程如下：

- (1) 人员操作自动化测试工具计算机，启动测试程序，计算机读取电子版测试用例，将所要进行的接线操作显示在屏幕上；
- (2) 测试人员阅读操作指令，查找接线位置，完成接线操作；
- (3) 计算机读取测试用例，根据用例中指定的信号类型（mA或V）、信号数值，对测试仪表进行程控操作；
- (4) 计算机读取测试用例，通过DCS控制器的维护网络通信协议读取变量值，记录测试结果。

对比两种测试方法的人员行为，如表1所示。

表1 AI通道测试中的人员行为

| 人员行为       | 人工测试 | 自动化测试 |
|------------|------|-------|
| 阅读测试用例     | √    | ×     |
| 响应操作指令     | √    | √     |
| 操作仪表       | √    | ×     |
| 操作工程师计算机   | √    | ×     |
| 操作自动化测试计算机 | ×    | √     |
| 读取数据       | √    | ×     |
| 记录结果       | √    | ×     |

通过上表对比可见，通过使用自动化测试工具，仅仅增加了少量工具的操作，但在很大程度上减少测试过程中的人员行为。

3.2 人员行为可靠度分析

USNRC, NUREG/CR-1278,1980 Peer-Review Study of the Draft Handbook for Human-Reliability Analysis With Emphasis on Nuclear-Power-Plant Applications中对人员行为的可靠度进行了估算。表2从中选取了部分测试过程中常见的人员行为。

表2 人工测试与自动测试的人员行为可靠度对比

|      | 人员行为            | 可靠度    | 出错概率  |
|------|-----------------|--------|-------|
| 人工测试 | 使用书写的规程（读写测试用例） | 0.9970 | 0.003 |
|      | 回想口头指令（响应操作指令）  | 0.9990 | 0.001 |
|      | 手动操作控制器（测试操作）   | 0.9970 | 0.003 |
|      | 读取定量信息（测试读数）    | 0.9940 | 0.006 |
| 自动测试 | 少量的人工操作         | 0.9970 | 0.003 |

在人工操作过程中，常见的人员行为包括读写测试用例、响应操作指令、执行操作、读取数据。以华龙一号堆型核电机组反应堆保护系统的测试为例，单台机组测试步骤数超过20万次。在不采取任何管理和技术手段的前提下，参考该手册数据，执行20万次的人工测试可能引入的人因错误将达到2500次。

而对于自动化测试，大量操作、信号读取、数据记录等操作，由自动化测试系统完成，人员仅需执行“少量的人工操作”，相应出错概率将降至0.003。加之在自动化测试工具开发过程中，对人机交互过程进行防人因失误设计，引入人因错误的可能性将大幅度降低。根据统计，在国内某电站的华龙一号堆型反应堆保护系统的工厂测试中人因操作错误，已降至50次以下。

另外，对于自动化测试技术的应用，对测试活动的规范化和标准化是先决条件。对于基于人工的测试，由于人的行为具有灵活性，其标准化是建立在方法、制度的基础上，再严格的制度和规范，仍然存在人的行为的不可控。对于基于计算机技术的自动化测试，由于计算机的特性，将严格按照既定的程序运行测试，其标准化和规范化不言而喻，同时也对其操作者的行为做出更加严格的约束，即操作者必须按照计算机程序所设计的

流程完成标准的动作流程。同时，在自动化测试的过程中，任何操作、异常、缺陷或故障，都会被系统实时、真实地记录下来，避免人工作业出现的“走捷径”的可能性，防止篡改记录、弄虚作假。

自动化测试技术的应用和推广，减少了人工操作的工作量，有效降低通过人因失误引入缺陷的可能性。与此同时，自动化技术对规范化、标准化提出了更加严格的要求，从而推动人员严格按照规定的程序办事，强化了入口条件、人员作业、交付成果的规范化、标准化，有利于促使人员养成按照规章办事的习惯，从而减少人因问题对测试质量带来影响。

## 4 总结

核电DCS的测试活动，是核电DCS系统产品确保核安全的关键质量屏障。测试技术人员通过多年的技术开发与应用实践，在自动化测试工具技术研发、有效性评价、推广应用、管理运维等方面深入研究、持续改进。相关技术已在CPR1000、高温气冷堆、华龙一号

等多种堆型的核电DCS系统测试中得到了应用，产品质量持续提升，为核电仪控领域的质量提升提供了可供借鉴的经验。

自动化测试技术的应用，能够通过替代人工操作、减少人因失误、规范人员行为、促进测试标准化等途径提升质量。其更加重要的意义在于，自动化工具能够将测试人员从机械的、重复的测试操作工作中解放出来，让他们能够有更多的精力深入测试设计分析、开展测试技术研究等更加有创造价值的工作中。在加大自动化测试技术研发投入的同时，鼓励全员参与测试管理和技术创新改进，不断推动测试质量的持续提升，形成了人人参与质量改进的核安全文化氛围，建立了学习型组织，推动一轮又一轮的PDCA循环，形成了良好的核安全文化氛围。 **AP**

### 作者简介：

张旭（1984-），男，工程师，硕士，现就职于北京广利核系统工程有限公司，主要从事核电厂数字化仪控系统测试和自动化测试技术研究工作。

### 参考文献：

- [1] 张旭. 核电站安全级控制系统自动化测试研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [2] 朱郁, 曹宗生, 汪海艳, 等. 一种核电站数字化仪控系统测试装置[P]. 中国专利: CN102184750A, 2011-4-13.
- [3] NUREG/CR-1278, 1980 Peer-Review Study of the Draft Handbook for Human-Reliability Analysis With Emphasis on Nuclear-Power-Plant Applications[Z].
- [4] 张旭, 江国进, 孙永滨, 等. 基于仿真平台的反应堆保护系统功能测试方法和装置[P]. 中国专利: CN107506297A, 2017-12-22.