

核电厂安全级DCS设备鉴定通用测试装置需求研究

The Study for Requirements of Test Instrumentation in Equipment Qualification of Safety-related Digital Instrumentation and Control System in Nuclear Power Plants

★北京广利核系统工程有限公司 时建纲

摘要：设备鉴定是保障核电厂设备在各类工况及相关环境下正常运行的必要技术手段，型式试验是设备鉴定的重要验证方法之一^[1]。为了实现鉴定试验测试的规范性、准确性，并提高测试效率，需要开发出具有通用性的自动测试装置，其首要工作是对测试装置的需求进行研究。本文综合研究被测对象和试验要求两方面的特点，包括被测对象的接口要素及功能逻辑；鉴定试验对测试装置的需求，即自动化、时效性、应力适应性和环境影响性；然后将上述两方面综合考虑，形成总体需求。

关键词：数字化仪控系统；设备鉴定；测试装置；试验环境；自动化；时效性；应力适应性；环境影响性

Abstract: The equipment qualification for safety equipment of digital instrumentation and control system is important to nuclear power plants. Type test is one of important part in equipment qualification. Developing automatic test instrumentation is necessary for realizing standardization, accuracy and efficiency test. This paper comprehensively analyzes the essentials requirements of test instrumentation by combining the characteristics of equipment qualification testing and the equipment under test. The characteristics of equipment can be generalized as the characteristics of interface and logical function, the characteristics of type test can be generalized as Automation, Real-time, Susceptibility and Emissivity.

Key words: Digital instrument and control system; Equipment qualification; Test instrumentation; Test conditions; Automation; Real-time; Susceptibility; Emissivity

1 引言

安全级DCS是核电厂的神经中枢系统，设备鉴定是保障其在各类工况及相关环境下正常运行的必要技术手段，同时也是实现核电自主化的核心技术之一^[2]。GB/T 12727《核电厂安全级电气设备鉴定》章节4指出：鉴定可以采取型式试验法、运行经验法、分析法或者这些方法的组合。因此，作为设备鉴定的重要方法之

一，型式试验法的准确高效是核电DCS项目顺利开展的重要保证。

在型式试验中，由试验室设备向试验对象施加应力（温湿度、电磁干扰、抗震试验等）；同时采用测试装置验证被测对象的功能和性能。上述关系如图1所示。

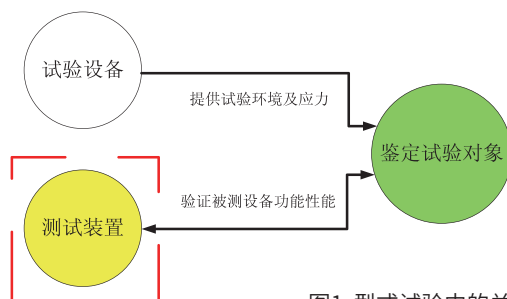


图1 型式试验中的关系

本文重点是研究测试装置需求，其目的是增强鉴定试验标准化、减少人因错误、提升测试效率。

目前国内外适用于DCS领域的自动测试装置，一般是在商业化的通用产品平台上开发的，技术成熟，并在测试领域得到普及应用^[3]。但是其应用于设备鉴定中，在覆盖DCS各类接口和功能、性能测试的基础上还应考虑鉴定试验的复杂性。目前行业内还没有对设备鉴定测试方法和测试工具的研究。研究的首要工作是分析鉴定对象和鉴定试验的特点，确定总体需求。

2 对试验对象分析

依据GB/T 12727：设备鉴定的状态监测是通过监

测一个或多个状态指标来确定设备是否保持在鉴定状态。因此需要依据被测设备的特性确定测试方式，进一步确定对测试装置需求。由于鉴定对象在试验中应处于运行状态，需要在试验应力环境中，在线确认其功能性能是否符合设计要求，不能进行板级测试或植入测试代码。因此在鉴定试验中，只能以“黑体”的形式进行验证，与其直接作用的是各类接口，包括：I/O通道、通信端口、人机操作界面。

DCS系统I/O信号包括模拟量电压及电流信号、热电阻（RTD）、热电偶（TC）、开关型/电平型数字量信号等。测试装置不仅需要在信号类型上匹配被测对象，还需要在量程、精度、时间响应、负载驱动能力等方面满足测试要求。对于其中的模拟量信号，根据HF003要求，测试设备的精度应高于被测设备。DCS的通信端口包括以太网、工业现场总线、通用设备端口等类型，测试装置需要在物理连接、通信协议方面与被测设备相兼容，实现数据传输。人机操作接口设备包括触摸屏、显示屏、指示灯、键盘、开关、按键等设备。目前通过光机电一体化装置可对上述设备实现自动测试。例如：由三台步进电机驱动机械臂可以实现对三维测试对象上的多个按键进行自动操作；采用图像识别技术可以自动判断核电显示设备的输出是否正确。还需要将对机电装置的控制以及对图像信号的采集整合在自动测试装置中，实现全自动测试。

在实现接口测试的基础上，通过测试软件实现对测试对象的功能和性能测试。对于核电厂安全级DCS，其运行具有确定逻辑，因此可依据设备的逻辑真值表实现对逻辑功能的验证。图2为采用逻辑真值表的形式实现自动测试。

F1-01-02 1.3 功率量程中子通量高（低定值）跳堆																						
控制信息						输入信号数量 7							输出信号数量 2							总测试步骤数 8		
序号	信号名称	信号类型	位号	单位	测试步骤																	
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
11	I11P棒控采集逻辑（触发变量及产生F108的变量）	AO	H12PNO30MAAPR	NPF	20	28	20	20	20	20	20	28	20									
12	PR_CHANNEL_TEST（产生I11PB的，I11PB是棒控采集逻辑单位，TEST信号、FAULT信号数值的逻辑）	DO	H12PNO30MATP2	-	F	F	F	F	F	F	F	F	F									
13	PR_CHANNEL_FAULT（产生I11PB的，I11PB是棒控采集逻辑单位，TEST信号、FAULT信号数值的逻辑）	DO	H12PNO30MATP2	-	T	T	T	F	F	T	T	T	T									
14	I1V通道的通道故障信号（工艺发出）	XDO	NP4431I51	-	F	F	F	F	F	T	F	F	F									
15	I1V通道的通道故障信号（工艺发出）	XDO	NP4431I51B	-	F	F	F	F	F	T	F	F	F									
16	111的BLOCK信号	XDO	H12PNO30SNC241	-	T	T	T	T	T	T	T	T	T									
17	111的BLOCK信号	XDO	H12PNO30SNC241B	-	T	T	T	T	T	T	T	T	T									
01	RPA200JA RPA201JA UV（通断报警信号）	DI	IFPA200JA_UV	-	T	F	T	T	F	T	F	T										
02	子组1停堆	DI	IFPA200C35	-	T	F	T	T	F	T	F	T										

图2 通过逻辑真值表实现对逻辑功能的验证

输入信号I1~I7的逻辑组合确定了输出信号O1、O2的数值。测试用例的执行可分解为若干测试步骤，对于每一步：首先通过对指定的I/O通道、通信端口向被测设备发送固定的数值；然后通过指定的通道、端口采集被测设备的输出值；测试装置将存储的真值表中的预期值与采集值进行比较，如果数值一致或在偏差准许范围内则通过测试，否则不通过。

除了功能测试外，鉴定试验还包括响应时间测试和模拟量精度等性能测试。响应时间测试复用功能测试通道，在测试功能的同时采用示波器或波形记录仪验证系统响应时间，示波器的通道可通过自动切换实现多通道测试。例如上述真值表中，信号“RPN030MAAPR”的电位值上升导致了信号“RPAZ200JA_UV”从高电平到低电平的跳变，测试步骤和测试变量的关系如图3所示。

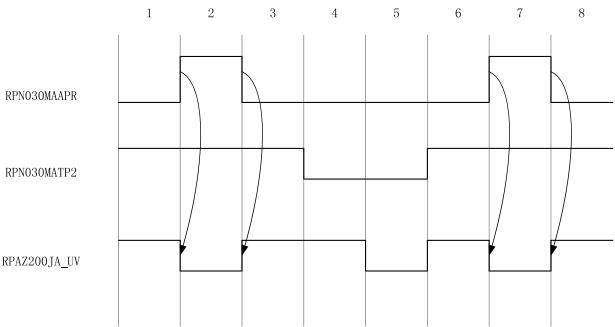


图3 测试步骤和测试变量的关系

参考《过程测量和控制装置通用性能评定方法和程序》要求：“试验用参比系统的不确定度应不超过被测装置规定误差限的1/4”，DCS模拟量通道精度通常可达到0.2%或更高，因此满足高精度测试设备的通道要达到万分之一的数量级，这类设备费用昂贵并且通道数量少。要实现多通道的高精度测试，在常规环境测试一般采用高精度仪表分别进行手动测试。而在鉴定试验中，受实验条件影响需要采用通道自动切换方式实现。

综合上述分析，对测试装置的总体需求归纳如下：

- (1) 实现与各类I/O通道在类型和量程上的兼容，并在数量、精度、驱动能力和负载配置上满足标准及试验大纲要求；
- (2) 实现与被测设备进行通信数据传输，满足硬

件端口和软件通信协议的兼容；

(3) 实现对触摸屏、显示屏、指示灯、键盘、开关、按键等人机操作接口设备自动测试；

(4) 依据设备的逻辑真值表实现对逻辑功能的自动测试，并复用功能测试通道，实现输入/输出通道的响应时间测试；

(5) 实现对仪器仪表的自动控制和数据采集，并实现对仪器仪表通道自动切换。

3 对试验应力分析

对于设备鉴定测试装置，在满足通用需求的基础上，还需要满足型式试验方面的需求。为了分析这部分需求，需要从鉴定试验标准入手，概括出试验项的特点，进一步推导出对测试装置的需求。

核电行业以GB/T 12727为主体标准，根据该标准，鉴定的试验项的应力包括：“环境温度和压力、相对湿度、辐照水平、运行基准地震和非地震性振动、运行周期、电负荷和信号、凝露、化学喷淋和浸没、电磁兼容（EMC）等条件”。由于安全级DCS设备通常安装在安全壳外的和缓环境下，因此符合GB/T 12727规定的K3鉴定试验方法要求，“辐照”、“化学喷淋和浸没”、“盐雾”以及“非地震性振动”等严酷运行环境下的应力，本文暂不做分析。在GB/T 12727的基础上，国内核电DCS行业综合考虑了美国标准体系及欧洲标准体系对设备鉴定的要求，由国家核安全局颁布了NB/T 20344《核电厂安全级电子设备鉴定规程》。该标准将鉴定试验条件分为“老化”、“极限运行条件”和“事故工况”三类。根据实际执行特点，这三类试验归纳为“基准试验”、“环境试验”、“EMC试验”、“抗震试验”，除基准试验外，其它试验项需要在应力下执行测试。

(1) 环境试验

环境试验中NB/T 20344以RG1.209为指导标准，并综合考虑EJ/T 1197-2007、IEC 60068-2、EPRI TR-107330等执行标准的覆盖，形成了国内行业内普遍认可的试验方法。以NB/T 20344规定的“方法二”为例，需要执行的试验项分析如表1所示。

表1 NB/T 20344 “方法二”需要执行的试验项分析

试验项	试验条件	应力中 通电	需求分析
温湿综合试验	55℃，95%RH，维持48h； 1.2℃，5%RH，维持8h	是	自动化：测试环境严酷，人员无法接触被测设备，需实现人机接口设备自动测试。
长期运行试验	55℃，300h； 40℃，300h	是	应力适应性：与被测设备接触的测试装置部分（如人机接口设备测试）需在高温、高湿的试验应力下正常运行。
交变湿热试验	55℃与25℃之间变化，湿度95%RH 24h一个循环，2次循环	否	在试验应力前后的和缓环境下执行测试，与基准试验的需求相同。
机械振动试验	10~500Hz， 0.075mm/1g 1oct/min，3轴向，每个轴向分三个阶段：共振频率探查阶段，扫频耐久阶段，定频耐久阶段。如果没有找到任何共振频率，则对100Hz进行定频耐久试验。	否	

基于上述分析，环境试验中对测试装置的需求归纳为对人机接口设备测试自动化需求以及对试验应力中部分的应力适应性需求。

(2) EMC（电磁兼容性）试验

EMC试验以RG1.180和IEC 62003为指导标准，执行上采用IEC 61000（与标准GB/T 17626系列等同），具体分析如表2所示。

表2 EMC试验试验项分析

试验项	试验位置	需求分析
发射试验	电源线传导发射	时效性：测试时间较短，要求功能、性能测试同步快速运行。
	辐射发射	自动化：在半波暗室中执行，人员无法接触被测设备，需实现人机接口设备自动测试。 环境影响性：测试装置不能对试验对象及环境造成影响。
EMI/RFI敏感性试验	交流电源线谐波抗扰度	交流电源线 时效性：测试时间较短，要求功能、性能测试同步快速运行。 应力适应性：测试装置的I/O及通信通道在浪涌组合波、电快速瞬变脉冲群、射频场感应的传导敏感性、振铃波等传导抗扰试验中不发生损坏以及精度超差；在工频磁场、脉冲磁场以及阻尼磁场抗扰度试验中不受试验应力影响出现功能异常。

	射频场感应的传导敏感性	电源线、信号线	自动化：在半波暗室中执行，人员无法接触被测设备，需实现人机接口设备自动测试。
	电快速瞬变脉冲群抗扰度	电源线、信号线	
	组合波抗扰度试验	电源线、信号线	
	振铃波抗扰度试验	电源线、信号线	
	0~150kHz共模传导骚扰抗扰度	电源线、信号线	
	辐射抗扰度	EUT壳体	
	工频磁场抗扰度	EUT壳体	
	脉冲磁场抗扰度	EUT壳体	
	阻尼磁场抗扰度	EUT壳体	
ESD 静电放电	静电放电	设备安装运行过程中可能接触到地方	时效性：测试时间较短，要求功能、性能测试同步快速运行。

基于表2分析，EMC试验中对测试装置的需求归纳为：对人机接口设备测试自动化需求、测试快速同步的时效性需求、对环境辐射的影响性需求以及对试验应力的应力适应性需求。

(3) 抗震及机械试验

对于抗震试验，我国已分别将IEC 60980及IEEE 344转化为GB 13625及HAF J0053，标准要求应对设备先进行5次OBE（基准地震模拟抗震）试验，再进行1次SSE（安全停堆地震）的模拟抗震试验，每次应力时间为30秒。对测试装置要求如下：

- 时效性：测试时间较短，要求功能、性能测试同步快速运行；
- 自动化：试验在抗震试验台执行，人员无法接触被测设备，需实现人机接口设备自动测试；
- 应力适应性：与被测设备接触的测试装置部分（如人机接口设备自动测试部分）需在高温、高湿的试验应力下正常运行。

(4) 概括总结

根据上述分析，对自动测试装置的需求概括如下：

- 自动化：试验条件严酷，如高温高湿环境，人员无法进入温箱操作按键或读取或指示仪表，就需要替代人工实现自动化测试；
- 应力适应性：试验环境对被测设备和测试装置都具有破坏性，例如EMC的浪涌试验，试验应力加载到信号线上，对测试装置通道也有破坏作用；
- 环境影响性：试验需要验证被测装置对周围环境的影响，例如EMC的辐射发射试验，对于靠近被测设备的测试装置，如果辐射超标也会影响试验结果；
- 时效性：试验应力加载时间短，例如抗震试验，每次应力为30秒，在这期间需要充分验证被测设备的功能、性能，就需要测试装置具有同步快速的时效性。

4 综合分析

综合以上两章对于试验对象和鉴定应力的分析，需要考虑在实现鉴定对象基础上可能涉及到测试环境的需求部分。例如对于I/O通道，在实现功能性能的基础上需要增加EMC传导抗扰需求；最终在设计中，增加这方面的防护措施，如增加浪涌防护器、退耦器件、实现信号线屏蔽接地等。

上述分析过程可通过二维表格来实现，纵向维度为通过对鉴定对象分析，需要实现的基本功能和性能；横向维度为鉴定试验应力需要测试装置满足的要求。现概括如表3所示。

表3 鉴定对象和鉴定试验应力需求分析

鉴定对象需求	鉴定试验应力需求		
	环境	EMC	抗震
实现与各类I/O通道在类型和量程上的兼容，并满足数量、精度、驱动能力；	d	c、e	f
实现与被测设备进行通信数据传输，满足硬件端口和软件通信协议的兼容；	d	c、e	f
依据设备的逻辑真值表实现对逻辑功能的自动测试；			
复用功能测试通道，实现输入/输出通道的响应时间测试；	b	b	b
实现对触摸屏、显示屏、指示灯、键盘、开关、按键等人机操作接口设备自动测试；	a、b、d	a、b、e	a、b、f
实现对仪器仪表的自动控制和数据采集；并实现对仪器仪表通道自动切换；	b	b	b

上述表格中试验应力部分对应如下:

(1) 自动化: 试验环境严酷, 人员无法接触被测设备, 需实现人机接口设备自动测试;

(2) 时效性: 测试时间较短, 要求功能、性能测试同步快速运行;

(3) EMC应力适应性: I/O通道及通信端口在传导抗扰类试验中不发生损坏, 精度不超标; 在辐射抗扰类试验中不受试验应力影响出现功能异常;

(4) 环境应力适应性: 与被测设备接触的部分(如人机接口设备自动测试部分)需在高温、高湿的试验应力下正常运行;

(5) EMC环境影响性: 测试装置整体或与被测设备接触的测试装置部分不能对被测设备以及试验环境造成干扰, 影响测试结果;

(6) 抗震应力适应性: 与被测设备接触的测试装置部分需在高温、高湿的试验应力下正常运行。

5 结论及展望

本文所述的分析方法及成果应用于阳江、防城港、田湾、海上小堆等核电站安全级DCS项目的鉴定活动, 在试验中实现了测试规范化、高精度和自动化, 并且克服了各项试验应力对测试装置的影响, 在项目中取得了很好的效果。同时可用于其它产品研发领域, 例如某项产品在实现各项功能和性能的同时, 必须考虑其使用环境; 将产品的功能实现和可能在使用中的应用环境结合起来形成全面有效的需求, 对于整个研发流程将奠定扎实的基础。AP

作者简介:

时建纲(1974-), 男, 北京人, 高级工程师, 现就职于北京广利核系统工程有限公司, 主要从事核安全级仪控系统的设备鉴定技术研究和质量评测工作。

参考文献:

- [1] GB/T 12727-2017, 核电站安全级电气设备鉴定[S].
- [2] 赵季红, 孙永滨, 张亚栋, 赵娜, 裴红伟. 核电站安全级数字化仪控系统设备鉴定样机的设计方法及实践[J]. 仪器仪表用户, 2019, (9): 74-77.
- [3] 胡华山. 基于PXI的卡片自动测试装置设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(3): 30-31.
- [4] 石舒健. 核电站数字化仪表控制系统设备鉴定方法研究[J]. 现代信息科技, 2019, 3(6): 87-88.
- [5] NB/T 20344-2015, 核电站安全级电子设备鉴定规程[S].
- [6] GB/T 18271.1-2017, 过程测量和控制装置通用性能评定方法和程序[S].