核电DCS系统工厂测试与现场调试逻辑功能验证方案对比分析和研究

Contrastive Analysis and Research of Logic Function Verification Schemes for Plant Test and Field Debugging of Nuclear Power DCS System

★北京广利核系统工程有限公司 郭旭东，齐敏，宋玉霞

摘要：当前国内核电机组的DCS验证采用工厂测试和现场调试独立策划的方式，国外三代核电（如EPR、AP1000等）的DCS系统采用工厂测试与现场调试总体策划的测试模式。本文借鉴EPR、AP1000的整体策划实践，通过对核电DCS系统工厂测试与现场调试逻辑功能验证方案进行对比分析和研究，找出差异，为核电DCS系统工厂测试与现场调试全范围功能测试实施打下基础，有利于核电DCS系统工厂测试、现场调试的优化和质量提升，从而控制工期和成本。

关键词：核电；DCS；逻辑；测试

Abstract: At present, the DCS verification of domestic nuclear power units is planned independently by DCS factory test and nuclear power factory debugging. The DCS system of three generations of foreign nuclear power plants (such as EPR, AP1000, etc.) adopts the test mode of overall plan of factory test and nuclear power factory debugging. Based on the overall planning practice of EPR, AP1000, this paper compares and analyzes the verification scheme of logic function between plant test and field debugging of nuclear DCS system, finds out the difference and lays a foundation for the implementation of full-range functional test of nuclear power DCS system factory test and field debugging, which is conducive to the optimization and quality improvement of nuclear power DCS system factory test and field debugging, so as to the control of construction period and cost.

Key words: Nuclear power plant; DCS; Logic; Test

1 引言

核电DCS系统的验证包括工厂测试和现场调试两个阶段，当前国内核电机组的DCS验证采用工厂测试和现场调试独立策划的方式，在DCS逻辑功能验证等方面存在交迭[1]。国外三代核电（如EPR、AP1000等）的DCS系统采用工厂测试与现场调试总体策划的测试模式，整体保证逻辑测试完整性，此方式已在国内的台山项目（EPR堆型）中得到应用，监管方面对全范围测试模式给予了一定的认可。借鉴EPR、AP1000的整体策划实践，广利核公司与中广核工程有限公司调试中心联合开展研究，通过分析各技术路线的工厂测试体系和调试体系，探讨和论证全范围DCS功能验证方案。全范围方案有利于核电DCS系统工厂测试、现场调试的优化和质量提升，有利于控制核电项目工期和成本。

基于此，以某工艺系统为例，对核电DCS系统工厂测试与现场调试逻辑功能验证方案进行对比分析和研究，分析工厂测试与现场调试的测试对象、测试流程和测试内容的异同，该分析研究为制定全范围DCS功能验证方案提供了基础。

2 概述

现场调试是依据HAD103/02-1987核电厂调试程序检查DCS在运输、安装过程没有损坏，系统上电后能够正常运行且恢复到出厂验收时的状态；检查由DCS实现的工艺系统监视、控制、保护功能满足设计需求。

工厂测试是依据合同、技术规格书、LD/AD、IO List、Set Point List证明系统的硬件和软件配置的完整性和正确性；证明工程组态完整、符合CNPDC正式发布的设计输入文件，如CLD图、定值手册等；确认DCS的功能和性能符合合同、技术规格说明书等要求。

（1）现场调试中工艺系统I&C逻辑功能验证

某工艺系统现场调试的工艺系统I&C逻辑功能验证通过TP09试验（即逻辑控制通道试验）开展。TP09试验目的是检查包括相关继电器等设备、数据处理系统、远程仪表显示和报警、待控制远程设备在内的所有设备

的正确运行。

测试原理：通过模拟触发试验工况（强制相应的逻辑或者操作相应的设备开关），查看报警是否正确触发、相应的设备是否正确发生动作、显示屏上的状态是否与就地命令一致，进而判断设备的功能是否完整且正确执行。

测试路径：强制相应逻辑功能（或者操作相应的设备开关）→系统内部逻辑处理→工况报警触发和设备动作→在盘台和KIC上查看相应报警状态及设备状态显示。

测试方法如图1所示。

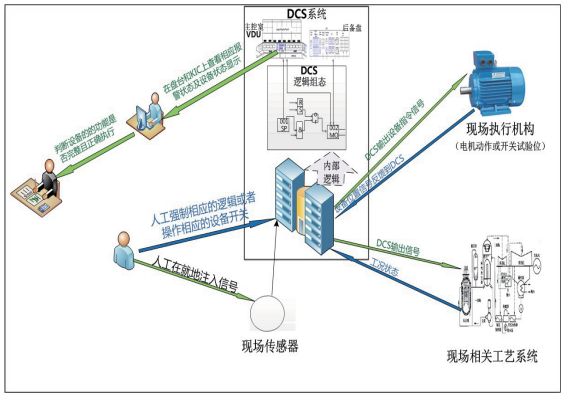

图1 工艺系统I&C逻辑功能验证现场调试方法示意图

（2）工厂测试中DCS逻辑功能测试

测试过程中使用自动化测试装置搭建的DCS系统集成环境，模拟现场应用场景、现场信号采集和执行设备。

工厂测试体系把DCS逻辑功能按XXX进行分类，分别设计不同的测试项。

针对TP09（以某工艺001PO为例）对应的工厂测试项包括：专设安全设施设备控制功能测试（L0）、优先级管理功能测试、SCID功能测试、APC功能测试、电厂画面检查、安全级和非安全级接口测试等。

测试方法及路径如图2所示。

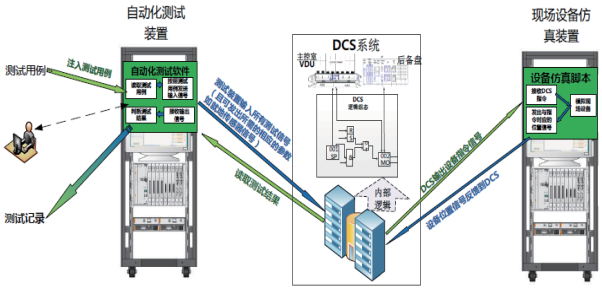

图2 工艺系统I&C逻辑功能验证工厂测试方法示意图

3 差异分析比较（某工艺001PO为例）

测试方法比较：现场调试使用人工手动测试方法，以设计输入逻辑功能为核心，测试时在现场实际集成环境下，需进行初始条件设置，同时由于工艺设备已连接DCS系统，需进行必要的设备隔离。工厂测试过程中使用自动化测试装置搭建的DCS系统集成环境，以逻辑组态实现与设计图纸一致性为核心，模拟现场应用场景、现场信号采集和执行设备，实现自动化测试。

测试覆盖完整性比较：以某工艺001PO为例，与该设备相关的逻辑图包括某工艺LD06/07/008/23/35/104/128、某工艺AD07、RRALD50、LHA LD42、KDS LD14/20。该设备逻辑如图3所示。

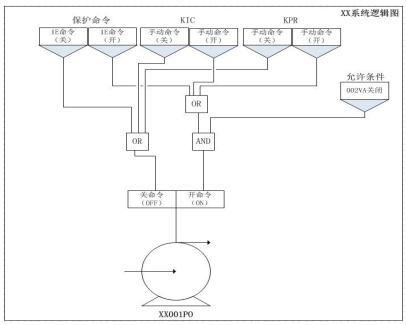

图3 某工艺系统逻辑图

该页逻辑图主要实现的是某工艺001PO的控制功能，包括某工艺001PO通过1E、SR、KDS指令，实现多样性控制。通过人工操作实现手动启停、通过保护逻辑实现自动启停等功能。所有功能在LD/AD逻辑图中均有详细的描述。

对于该设备的测试，现场调试和工厂测试的测试范围如图4和表1所示。

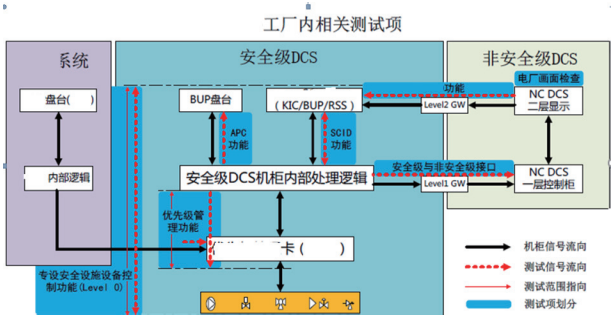

图4 覆盖范围对比图

表1 覆盖范围对比

	现场调试程序（TP09）	工厂测试测试项	分析比较
工艺系统I&C逻辑功能	按照逻辑图及模拟图完成系统功能验证： · 手动控制功能试验； · 自动控制功能试验（不同1E/SR/NC信号通道逐项设计功能模拟验证）； · 报警逻辑及报警通道试验。	专设安全设施设备控制功能测试（L0）	测试方法：现场调试验证到就地设备实际动作，程序按逻辑图/模拟图设计功能要求为单元进行编制，工厂内通过测试装置模拟现场设备的方式实现，测试用例重点在逻辑组态实现完整性和正确性。 覆盖完整性：工厂测试与调试试验从不同维度和方法进行设计正确性功能验证，范围基本一致。
		优先级管理功能测试	
		SCID功能测试	
		APC 功能测试	
		电厂画面检查	
		安全级和非安全级接口测试	

工厂测试覆盖分析：

（1）辑级：图3中的逻辑功能通过专设安全设施设备控制功能（以下简称：L0）测试项进行验证，L0以LD页为基础进行测试设计形成真值表，真值表体现逻辑图中所有的输入输出点、报警点、指示灯状态，覆盖图3上所涉及的全部逻辑信息。图5为测试真值表示意图。

	序号	信号来源	信号类型	测试步骤																								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
输入	I1	1E1-ON	DO	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1①	1①	0	0
	I2		DO	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1②	1①	0	0
	I3	1E2-ON	DO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1②	1①	0	0
	I4		DO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1②	1①	0	0
	I5	就地 ON	DO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1①	1②	1	0
	I6	就地 OFF	DO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	I7	其他DCS-ON	DO	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
	I8	DCS-ON	CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	I9	DCS-OFF	CO	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
	I10	1E1 SET BYPASS	DI	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	I11	1E2 SET BYPASS	DI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	I12	就地 PERMIT	DI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1①	1②	1	1
	I13	其他DCS TEST PERMISSION	DI	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
输出	O1	OUT1	DO	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
	O2	DCSC	XDO	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
结果		实际输出与预期输出一致则标记“√”，否则“×”																										
备注																												

图5 设备控制功能测试用例

（2）设备的安全级和非安全级接口：设备的安全级和非安全级接口通过安全级和非安全级接口测试项进行验证测试。

（3）设备控制功能级：某工艺001PO泵的分级控制通过优先级管理功能测试项进行测试验证。

（4）设备功能报警级：该设备的1E和SR相关的报警通过专设安全设施设备控制功能测试项和APC功能测试项进行测试验证。

（5）设备显示功能级：设备显示相关画面通过电厂画面检查测试项进行测试验证。

现场调试覆盖分析：

某工艺系统逻辑控制通道试验调试程序（TP09）试验的目的是检查设备的正确运行、在KIC/BUP显示和设备操作动作正确、系统逻辑功能满足逻辑图和模拟图设计要求。试验时分别在KIC/RSS/BUP对设备进行启停操作，并通过模拟信号或强制信号等方式对设计要求的逻辑功能、联锁逻辑等进行逐项验证。如图6所示。

试验步骤		
序号	试验步骤	预期
1	确认初始状态	1、某系统泵及其出口调门停运；
2	设置某流量***为**t/h,	1、某系统泵及其出口调门停运；
3	请在投入自动时设置某流量**为**t/h 请设置某流量**在15t/h,	1、某系统泵及其出口调门停运；
4	按下启动按钮	1、某系统泵及其出口调门启动；
5	请开始设置注入容积某流量在0	1、某系统泵及其出口调门停运； 2、隔离阀按预期进行调节
6	注入保护关信号	1、某系统泵及其出口调门停运；
6	注入保护开信号	1、某系统泵及其出口调门启动；

图6 某工艺系统试验调试程序

经过上述分析及差异比较，现场调试和工厂测试的测试方法得出的效果对比如图7所示。

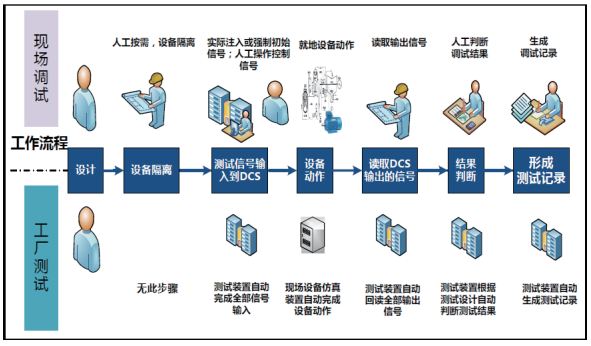

图7 效果对比图

4 比较分析结果

现场调试和工厂测试方法得出的分析比较如表2所示。

表2 现场调试和工厂测试方法分析比较

验证内容	现场调试	工厂测试	分析比较
工艺系统I&C逻辑功能	以工艺设备操作为主体，以设计逻辑功能为验证项，逐项功能完成试验。	分段交迭的方式对相关工艺进行分项验证。	工厂测试与调试TP09试验范围一致。工厂测试项是验证逻辑、设备功能不可或缺的基本测试，在试验覆盖范围和信号工况组合验证方面是优于TP09的。 工程测试与调试试验方法不同，前者重在验证逻辑组态的正确性和完整性，后者重在验证设计要求功能实现的完整性和正确性。

			运输及二次安装涉及到DCS机柜及设备的接口部分重新端接或回装，相关接口变化部分需要在现场调试阶段重点验证。

5 结论

经过上述分析及差异比较， 研究得出如下结论: 工厂测试与调试TP09试验范围一致。工厂测试项是验证逻辑、设备功能不可或缺的基本测试，在试验覆盖范围和信号工况组合验证方面是优于TP09的。

工程测试与调试试验方法不同，前者重在验证逻辑组态的正确性和完整性，后者重在验证设计要求功能实现的完整性和正确性。

运输及二次安装涉及到DCS机柜及设备的接口部分重新端接或回装，相关接口变化部分需要在现场调试阶段重点验证。AP

作者简介：

郭旭东（1984-），男，北京人，工程师，学士，现就职于北京广利核系统工程有限公司，主要从事核安全级数字化系统测试验证研究工作。

齐　敏（1974-），女，河南驻马店人，正高级工程师，硕士，现就职于北京广利核系统工程有限公司，主要从事核安全级数字化仪控系统研究工作。

宋玉霞（1974-），女，天津人，工程师，硕士，现就职于北京广利核系统工程有限公司，主要从事核安全级数字化系统测试验证研究工作。

参考文献：

[1] 王怀敬, 马吉强. 核电站数字化仪控自主化和国产化探讨[J]. 自动化博览, 2006, (05) : 20 - 22.

[2] Enrico Zio, Francesco Di Maio. Processing Dynamic Scenariosfrom a Reliability Analysis of A Nuclear Power Plant Digital Instrumentation and Control System[J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 36 (9) : 1386 - 1399.

[3] 刘正升, 万程亮, 蒋志忠, 杨日杰. 自动测试系统中新技术的发展及应用[J]. 中国测试, 2009, (04) : 58 - 61.

[4] 刘鹏飞, 林萌, 侯东, 陈智, 杨燕华. 核电厂DCS系统功能验证工程模拟机研究[J]. 核动力工程, 2009, (S1) : 48 - 51.

[5] 徐细波, 徐洪强, 宋艳萍. 计算机仿真技术与信息处理结合探究[J]. 中国无线电电子学文摘, 2011, (02) : 253 - 255.

[6] Dong Hou, Meng Lin, Zhihong Xu, Yanhua Yang. Developmentand Application of An Extensible Engineering Simulator for NPP CS closed — Loop Test[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 38 (1) : 49 - 55.

[7] 李瑞先, 谭德荣, 曹雁锋. 基于组态王测控系统软件的设计及实现[J]. 测控技术, 2006, (06) : 57 - 59.

[8] 李军. 网络环境下软件测试自动化技术的研究与应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.

[9] 郄永学, 支源. 核电站数字化仪控系统工厂测试综述[J]. 自动化博览, 2012, (11) : 50 - 54.

[10] 秦立斌, 陈东, 钱海. 负荷通道动态增容专家评估系统研究[J]. 电源技术, 2017, 41(02) : 305 - 309.

[11] 白鹭. 宁夏电网输电线路动态增容系统研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.