

文章编号: 0258-0926(2018)03-0081-04; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0081

大亚湾核电站模拟控制系统数字化升级 验证平台方案研究

方郁¹, 熊国华¹, 马蜀², 蔡叶发², 况德军³, 彭超³

1. 中广核研究院有限公司, 广东深圳, 518124; 2. 中广核核电运营有限公司, 广东深圳, 518124;
3. 大亚湾核电运营管理有限责任公司, 广东深圳, 518124

摘要: 根据大亚湾核电站现有模拟控制系统的范围与实际情况, 分析了信号配置、接口类型以及典型控制回路。结合第 3 个 10 年大修控制系统数字化升级的需求, 提出了验证平台的技术要求, 并搭建了基于数字化控制系统 (DCS) 小系统、工艺仿真系统与集中控制模拟量机柜 (KRG) 系统的验证平台; 针对具体的验证内容, 给出了详细的验证方案。利用验证平台开展相应的验证工作, 可有效地识别改进前后的平台差异性, 保证数字化升级的顺利实施。

关键词: 核电厂; 模拟控制系统; 数字化升级; 验证平台

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A

Research on Digital Upgrade Verification Platform Scheme for Simulation Control System of Daya Bay Nuclear Power Station

Fang Yu¹, Xiong Guohua¹, Ma Shu², Cai Yefa², Kuang Dejun³, Peng Chao³

1. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong, 518124, China;

2. China Nuclear Power Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China;

3. Daya Bay Nuclear Power Operation and Management Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract: According to the scope and actual situation of the existing simulation control system in Daya Bay Nuclear Power Station, the signal configuration, interface type and typical control loop are analyzed. In this paper, the technical requirements of the verification platform are put forward, and the verification platform based on DCS system, process simulation system and KRG system is set up. The specific verification contents are also given in detail. Using the verification platform to carry out the corresponding verification work, the differences before and after the improvement of the platform can be effectively identified to ensure the smooth implementation of digital upgrades.

Key words: Nuclear power plant, Analog control system, Digital upgrade, Verification platform

0 引言

大亚湾核电站现有仪控系统属于 20 世纪 70 年代的技术设备, 以组件组装式模拟器件和继电器为主, 辅以少量的可编程控制器 (PLC)。随着机组的持续运行与仪表控制技术的发展, 以模拟量板件、继电器为主的控制技术已处于逐渐淘汰状态, 备品备件采购日趋困难, 给机组的运

行及设备维护带来技术上和经济上的双重负担。因此, 为达到保障电厂安全运营与延寿的目的, 对大亚湾核电站仪控系统进行数字化升级势在必行。

根据电厂规划, 计划在第 3 个 10 年大修时进行常规岛控制系统及核岛集中控制模拟量机柜 (KRG) 反应堆保护控制第五组 (SIP_V) 数字化改造。常规岛改造范围为 GEM80 PLC 控制系

统、常规岛 KRG 控制系统、常规岛开关量控制柜 (KCO) 继电器控制系统。核岛 KRG SIP V 组涉及核岛各系统调节阀门的控制。

岭东核电站以及后续新建核电机组均已实现全厂控制系统数字化, 但大亚湾核电站机组有其自身的特殊性: 原模拟系统中有大量的非标准信号以及特殊接口; 现场设备电缆基本保持不变导致功能分组与信号配置与新机组差别较大; 第 3 个 10 年大修电站主控室维持现状需要做好手操接口与数字化控制系统 (DCS) 之间的匹配; 个别信号在新规范要求中需要提升功能或提高安全级别; 现有空间布局限制导致现有标准 DCS 机笼与机柜无法完全满足现有要求。诸多特殊情况与限制条件, 使得第 3 个 10 年大修的数字化升级改造不可能按照新机组模式来开展工作, 大修时间窗口也不可能像新机组调试一样有足够充裕的时间, 因此必须在前期对各种可能情况进行充分验证。

本文通过梳理现有控制系统的信号与配置, 选取合理典型的验证回路, 提出验证平台的功能需求和技术要求; 搭建基于现有成熟数字化系统验证平台系统架构, 从设计、组态、调试、分析、优化等方面为数字化改造提供技术依据, 最终达到 DCS 经过验证平台验证后, 直接即可利用于现场运行的目的, 以节省大修关键路径时间。

1 控制系统现状

常规岛控制系统 (KRG 与 KCO) 主要执行模拟量信号的集中转换、处理、接口及控制。系统主要采用早期的模拟组装仪表和继电器^[1]。

核岛 SIP V 组采用纯模拟板件实现非安全级仪控系统的模拟量处理和自动调节回路的控制。

大亚湾核电站仪控系统结构如图 1 所示, 数字化升级范围与外部的接口有: Level 0 层设备: 压力、流量、水位、温度等开关与变送器;

电气转换装置 E/P 等; 集中数据处理系统 (KIT)、试验数据采集系统 (KDO); 主控室系统 (KSC): 手操器、记录仪、指示表、指示灯、开关、按钮。现有系统涉及信号类型多达 17 种, 具体见表 1 所示。

2 典型回路选取

根据电厂的实际情况, 其控制回路主要包括常规岛开环控制、常规岛模拟量闭环调节、核岛

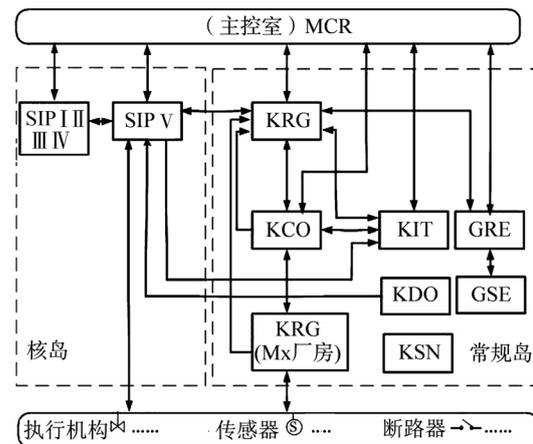


图 1 仪控系统结构图

Fig. 1 Structure of Instrument Control System
MCR—主控室; SIP—反应堆保护控制组; GRE—汽轮机调节系统; GSE—汽轮机保护系统; KSN—三废处理系统; MX—气轮机厂房

表 1 现有系统信号类型表
Table 1 Signal Type of Existing System

类型	描述
DI-Type1.1	开关量输入
DO-Type2.1	125V DC 继电器输出
DO-Type2.2	48V DC 继电器输出
AI-Type3.1	4~20 mA 两线制输入
AI-Type3.2	4~20 mA 四线制输入
AI-Type3.3	三线热电阻输入
AI-Type3.4	四线热电阻输入
AI-Type3.5	热电偶输入
AI-Type3.6	振动、轴位移等信号
AI-Type3.7	RPN 0-10V 大选信号
AI-Type3.8	手操器接口信号
AI-Type3.9	1~5 V 输入
AO-Type4.1	4~20 mA 输出
AO-Type4.2	100~500 mV 输出
AO-Type4.3	0.2~1 V 输出
AO-Type4.4	1~5 V 输出
AO-Type4.5	频率信号输出

DI—开关量输入; DO—开关量输出; AI—模拟量输入; AO—模拟量输出; DC—直流; RPN—堆内测量系统

开环调节、核岛模拟量闭环调节、顺序控制等。从典型回路的复杂性、代表性、包容性、重要性考量, 结合控制系统现有的接口与典型信号类型, 选取典型回路。

2.1 核岛典型控制回路

以核岛给水流量控制系统 (ARE) 阀门 ARE031VL 控制为例, 以现有 SIP V 机柜中典型机柜 (机柜尺寸、电缆走向、I/O 规模) 为依据,

采用现有 DCS 标准机笼满足最大量 I/O 点采集的需求，在 DCS 中实现其控制逻辑，验证其性能参数在 DCS 与在核岛 KRG 中的等效性，并验证标准机笼及机柜的适用性与可靠性以及现有主控室手操器功能。

2.2 常规岛典型控制回路

以常规岛凝结水抽取系统（CEX）阀门 CEX025/026VL 控制为例，以现有 KCO 机柜中典型机柜（机柜尺寸、电缆走向、I/O 规模）为依据，开发 DCS 非标准机笼与机柜（因现有 KCO 机柜内 I/O 规模较大，现有标准 DCS 机笼无法安装足够的 I/O 模块），满足最大量 I/O 点采集的需求，在 DCS 中实现其逻辑控制，验证其性能参数在 DCS 与在 KRG 中的等效性，并验证此非标准机笼及机柜的适用性与可靠性以及现场手操器功能。

2.3 GEM-80 PLC 数字化顺序控制回路

以 KRG202AR Bay1（KRG 系统 202AR 的

子机柜 1）控制为例，以现有 KRG 机柜中典型机柜为依据，开发非标准机笼与机柜（因现场空间尺寸限制，标准机柜无法放置），满足最大量 I/O 点采集的需求，将其 GEM80 PLC 程序在 DCS 中还原，验证其性能参数在 DCS 与在 KRG 中的等效性，并验证此非标准机笼及机柜的适用性与可靠性。

3 系统验证平台

验证平台用于现有控制系统数字化升级过程中开展各种设计、验证工作，其必须满足基本的技术要求：即能对比模拟控制系统与数字化控制系统，在此基础上能分别开展 DCS 安全性、正确性、可靠性验证；故障模式验证；系统操作验证；接口信号验证；不同数字化平台之间的通信验证等。

为满足上述技术要求，验证平台的总体网络结构如图 2 所示。验证平台由 3 大子系统组成，

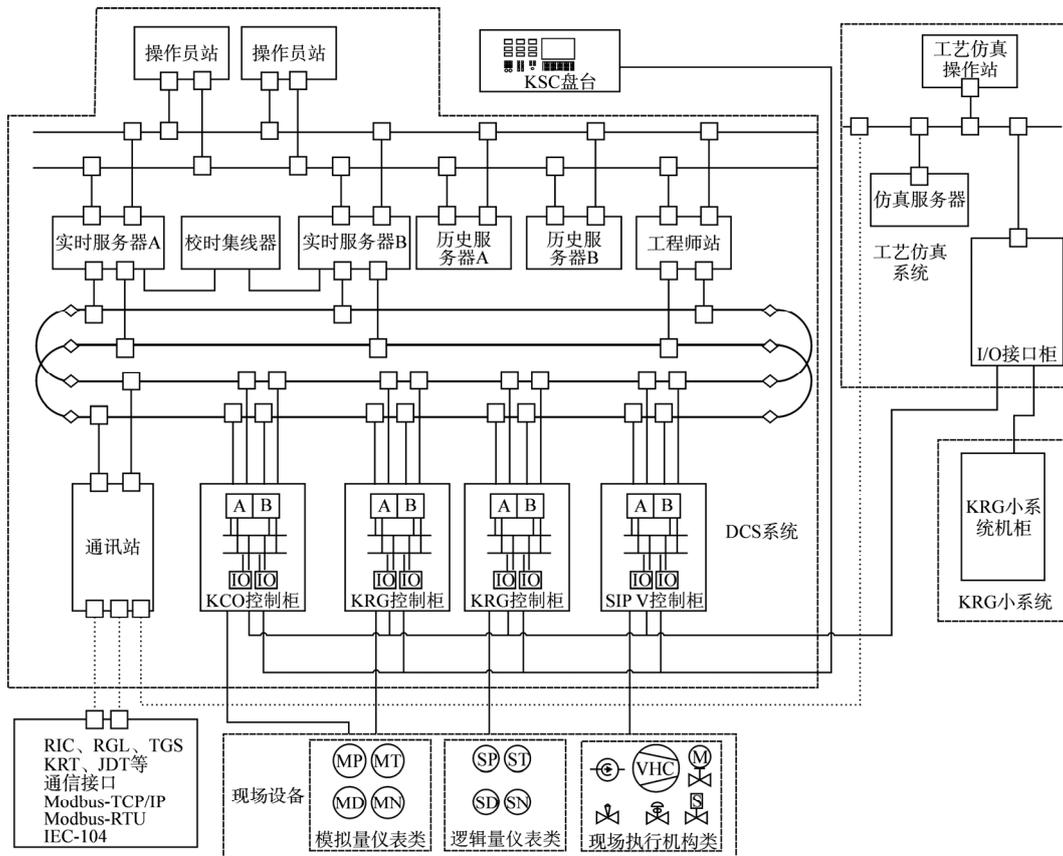


图 2 验证平台整体网络架构图

Fig. 2 Overall Network Architecture of Verification Platform

MP—压力变送器；MT—温度变送器；MD—流量变送器；MN—液位变送器；SP—压力开关；ST—温度开关；SD—流量开关；SN—液位开关；M—电动操作机构；S—电磁操作机构；RIC—堆外测量系统；RGL—棒控棒位系统；TGS—气轮机系统；JDT—火警系统；Modbus-TCP/IP；Modbus-RTU、IEC-104 是标准的通讯协议名称

分别为 DCS 小系统、工艺仿真系统、KRG 小系统。

3.1 DCS 小系统

DCS 小系统采用分布式网络结构,配置冗余控制器(DPU)、冗余系统服务器/历史数据服务器和冗余网络。任一 DPU、服务器或者网络故障,不会影响系统的正常运行,并且不会丢失数据。任一 I/O 采集站故障或者操作站故障不会影响整个系统的正常运行。DCS 小系统包括各种控制柜、服务器系统、操作员(HMI)系统、网络系统、网关系统、KSC 盘台等。

(1) 控制柜:KCO 控制柜、KRG 控制柜、SIP-V 控制柜分别用于典型顺序控制、常规岛闭环调节、核岛闭环调节,同时开展机柜结构验证、机柜内布局验证。

(2) 服务器系统:验证平台系统的实时服务、计算服务、历史服务。

(3) HMI 系统:验证平台的操作、显示功能以及软硬手操切换功能。

(4) 网络系统:验证平台系统的网络系统。

(5) 网关系统:验证平台与第三方系统(RGL、RIC、KIT、JDT、TGS)的通讯接口。

(6) KSC 盘台:根据所选典型回路,用于安装所涉及到的手操器、操作按钮、显示仪表、指示灯等设备。

3.2 工艺仿真系统

利用大亚湾核电站现有的全范围模拟机仿真

模型,通过硬接线方式与实际控制系统(DCS 或者 KRG)进行连接,完成控制系统的开环或闭环控制。仿真模型在服务器中运行,因此需要开发 I/O 接口程序实现与 DCS(或 KRG)之间硬连接。同时,考虑到现有模拟机模型软件存储数据的局限性,通过 DCS 通讯站,将工艺仿真模型中部分非硬接线数据通过网络采集至 DCS,方便数据存储与数据分析。

由于验证平台主要进行 CEX、ARE、KRG202AR-Bay1 等部分回路的验证工作,因此,需要根据验证范围梳理工艺仿真模型的边界,确定与之相关的 I/O 点数,并开发 I/O 接口快速切换软件,切断仿真服务器内验证对象的工艺仿真模型与仪控仿真模型的 I/O 接口,以便工艺仿真模型与外界的 DCS 或 KRG 硬系统对接。

工艺仿真系统架构见图 3,其组成包括:

(1) 仿真服务器:仿真服务器用于进行大规模仿真计算,仿真模拟核电厂运行状态、进行相关运行配置等;虽然核电厂的整个工艺系统都在仿真运行,但验证对象限定在少数典型的工艺回路,因此,需要结合快速接口切换程序,将典型回路“隔离”,以便 DCS 或 KRG 小系统与之对接。

(2) PLC 机柜:装载 PLC 软、硬件,基于工业级控制器及智能 I/O 模块,可以完成数据输入输出、模拟-数字(AD)转换以及控制运算的功能。PLC 机柜作为仿真服务器与 DCS 的中间桥梁,实现软点与硬点的交互。

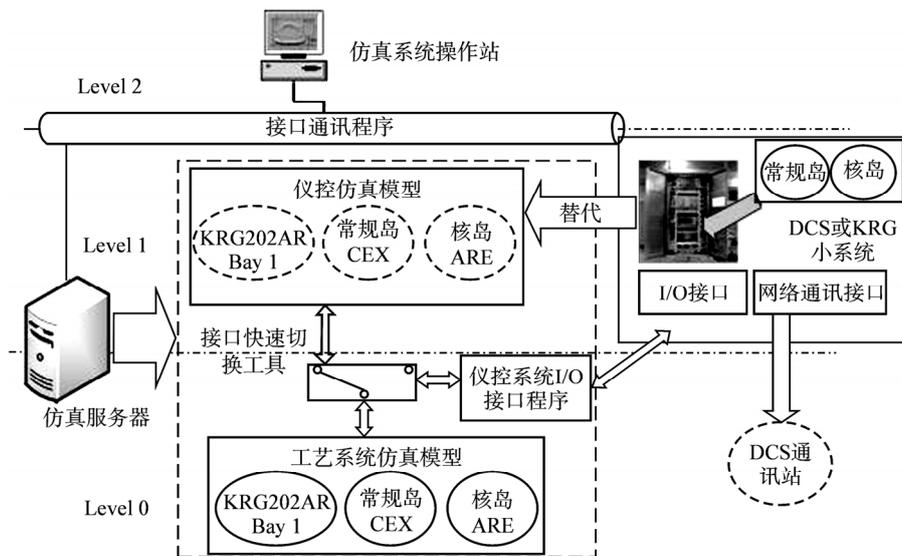


图 3 工艺仿真系统架构

Fig. 3 Architecture of Process Simulation System

(3) 仿真操作站：作为工艺仿真系统的操作台，用于模拟机软件的配置与管理。

(4) 网络：基于 TCP/IP 的以太网，实现仿真服务器与 DCS 之间的网络通信，解决工艺仿真系统数据存储局限性以及 PLC 机柜 I/O 点数的限制问题，方便更多的验证试验数据通过网络采集送至 DCS，以便借助 DCS 强大的数据存储、处理、分析能力。

3.3 KRG 小系统

根据所选取的典型控制回路，完全对照电厂实际的配置情况，利用现有 KRG 板卡备件（常规岛 4 系列板件、核岛 M 系列板件），搭建 1 套 KRG 模拟控制系统，实现所选典型控制回路的控制。用于作为 DCS 小系统的验证对比，验证未来 DCS 代替 KRG 之后，其功能的可靠性与一致性。

4 平台的功能验证

4.1 接口信号验证

根据电站现有 KRG 的信号接口（图 4），其大部分信号为非标准信号，在目前的数字化系统中，除热电偶与热电阻信号外，其绝大部分信号为 4~20 mA 标准信号；同时还需考虑数字化系统中 I/O 板卡的带负载能力。因此需要进行相应的信号转换，并进行充分验证，确保未来 DCS 能与电站现有的接口完全匹配与兼容。

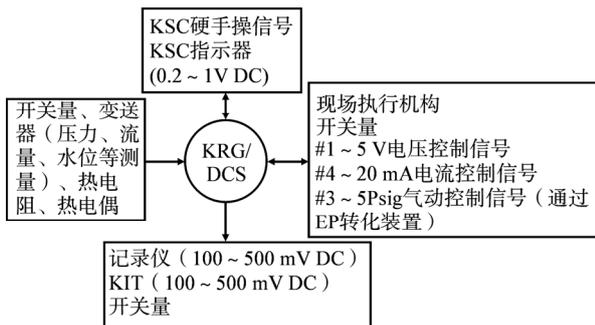


图 4 信号接口验证范围

Fig. 4 Verification Scope of Signal Interface

4.2 典型回路验证

主要包括上述提到的核岛模拟量闭环调节验证、常规岛模拟量闭环调节验证、典型顺序控制回路验证。

4.3 DCS 软手操与主控硬手操切换验证

以常规岛典型控制回路 CEX025/026VL 为

例，在 DCS 平台中的操作切换与在 KRG 中的功能等效性，并验证在 DCS 中的无扰切换功（图 5）。

4.4 模拟控制与 DCS 控制品质对比验证

给定相同的响应，通过对比在 DCS 与在 KRG 中的控制性能与品质参数（主要包括稳定性、准确性、快速性），进一步合理优化参数，确保各工艺系统的控制在 DCS 中性能更优。

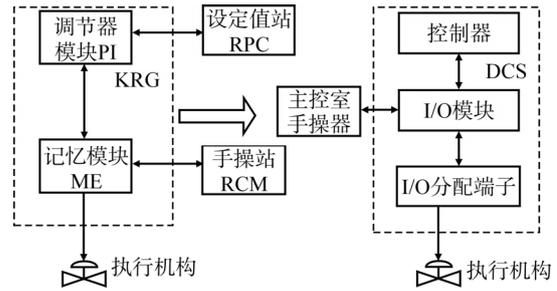


图 5 无扰切换验证

Fig. 5 Non Perturbed Handoff Verification
RPC—设定值站；RCM—手操站；ME—记忆模块

4.5 故障处理与容错机制验证

由于设备故障处理（如断线、超量程等）在 KRG 与 DCS 之间的不同，为充分发挥数字化系统的优势，验证在 DCS 中缺省值设置以及保护降级的处理等功能。

5 结束语

在梳理大亚湾核电站现状配置与数字化升级验证需求的基础上，重点研究了系统验证平台的技术要求与整体架构，并就验证平台的功能进行了详细阐述。目前，验证平台的设计工作基本完成，正在开展功能需求中的具体验证工作。利用该验证平台，在确定了数字化系统完全能实现现有 KRG 功能基础上，可以开展电厂所有工艺系统数字化升级的功能与品质验证，实际改造升级过程的控制参数可以完全通过验证平台获得，能大大缩短大修期间的调试时间并保证第 3 个 10 年大修数字升级工作的顺利推进。

参考文献：

[1] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备 [M]. 北京：原子能出版社，2005.

（责任编辑：张明军）