

核电数字孪生系统DCS初始化技术研究

童辉, 赵阳, 庄莉

核动力运行研究所, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年8月7日; 录用日期: 2023年9月8日; 发布日期: 2023年9月15日

摘要

本文提出了一种核电数字孪生系统DCS初始化方法, 使数字孪生仿真模型具备跟踪核反应堆指定时刻状态的能力。该方法通过建立数字孪生系统仿真模型参数和机组运行数据的映射关系, 经数据分析后找出待初始化设备及其目标状态, 根据不同设备的特性分别对其进行控制, 最终确保数字孪生系统与机组状态一致。

关键词

核电, 数字孪生, 仿真模型, DCS初始化

Research on DCS Initialization Technology for Nuclear Power Digital Twin System

Hui Tong, Yang Zhao, Li Zhuang

Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan Hubei

Received: Aug. 7th, 2023; accepted: Sep. 8th, 2023; published: Sep. 15th, 2023

Abstract

A DCS initialization method for nuclear power digital twin system is proposed, which enables the digital twin simulation model to track the state of the nuclear reactor at the specified time. This method establishes a mapping relationship between the parameters of the digital twin system simulation model and the operating data of the unit. After data analysis, the equipment to be initialized and its target state are identified. Based on the characteristics of different equipment, they are controlled separately to ensure consistency with the unit state.

Keywords

Nuclear Power, Digital Twin, Simulation Model, DCS Initialization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

核电仿真模型是实现孪生核电站的基础。真实核电机组的不同设备、系统对应不同的仿真模型，这就导致仿真建模需要具备设备多样、参数多样、属性多样的复杂关系属性。建立核电数字孪生系统首先要对各种复杂设备的参数、性能、特征、以及设备之间的关系进行数字表达，满足静态以及动态的设备及系统建模需要(如设备约束关系、设备上下游关系、设备参数动态定义、设备参数关联性等)，以适应不同设备、系统、机组的定义需要[1]。

要实现现实核电站与数字孪生系统的交互与协同，就需要使用高效的数据分析和计算技术，譬如利用分布式并行计算技术、多线程技术等，将各类核电设备和系统的性能参数、运行状态、影响因素和运行流程实时反馈在仿真模型中，继而实现针对系统和设备运行过程的真实映射[2]，这就是仿真模型状态跟踪技术。

DCS 初始化是仿真模型状态跟踪技术中的关键环节。DCS 初始化有两种思路：一种是通过过程控制层(DCS 一层)的初始化实现，这种方法虽然精度和效率较高，但要求核电机组存储海量的历史数据，一般核电站出于安全考虑不会存储一层的 I/O 及中间变量，因此这种方法不能普及；另一种是通过对人机界面层(DCS 二层)的初始化实现，这种方法不能保证初始化后的数字孪生样机与机组 DCS 完全一致，但是能够保证样机所有设备状态与机组一致，满足仿真模型状态跟踪的要求，因此，本文采用基于 DCS 二层的初始化方法。

2. 原理分析

2.1. 系统组成结构

DCS 初始化工具的功能是将数字孪生系统仿真模型中的各个设备在较短时间内自动达到指定的电厂某个时刻实际运行状态。DCS 初始化工具的输入是电厂某时刻的实际运行数据，输出是达成和电厂运行状态一致的设备仿真模型。(图 1)

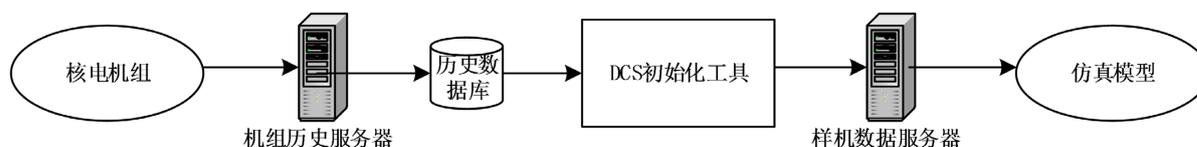


Figure 1. DCS initialization system composition structure diagram

图 1. DCS 初始化系统组成结构图

2.2. DCS 初始化工具功能模块

根据电厂实际运行数据分析和模型建模经验，将 DCS 初始化工具分为创建跟踪点、初态分析以及初

始化三大模块，各模块依次按顺序执行。下文介绍三大模块各自的主体功能设计。(图 2)

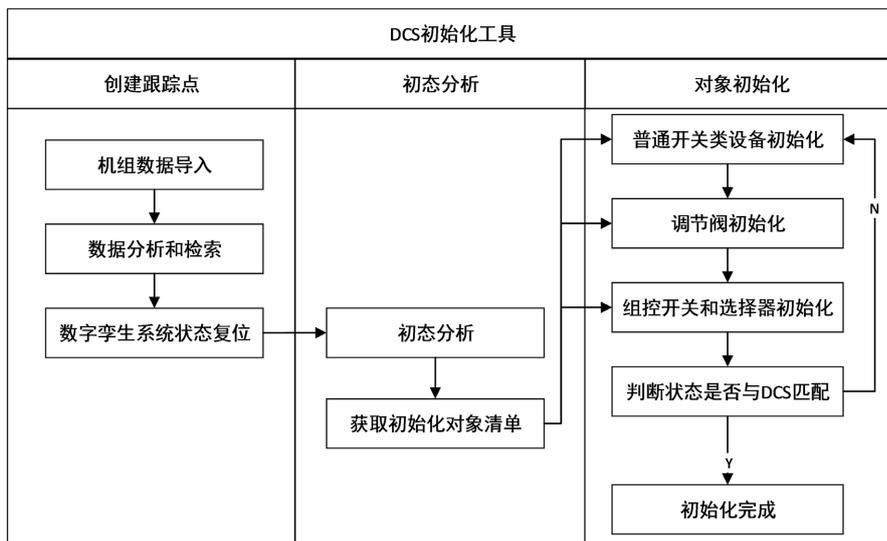


Figure 2. DCS initialization tool module relationship diagram

图 2. DCS 初始化工具模块关系图

3. 实现方法

3.1. 创建跟踪点

创建跟踪点是指 DCS 初始化工具接收到电厂 DCS 某一时刻的运行数据后，对数据进行分析，初步判断当前的数据和已保存的仿真模型 IC 数据的参数近似性，并将数字孪生系统复位到与电厂该时刻最相近状态的过程。状态确认分为机组数据导入、数据分析和检索、和数字孪生系统状态复位 3 个步骤。

为驱动状态复位功能，需预存足够的模型 IC (初始状态)。按 5% 功率间隔从满功率到零功率降低过程保存 21 个 IC 状态和零功率到 40% 全功率 8 个 IC 状态，共 29 个预存 IC 状态点。按功率 P、温度 T 对应 IC 号 N 关系建立检索函数关系式：

$$f(P,T) = N$$

3.1.1. 机组数据导入

在核电数字孪生系统中，预先将机组数据存储到时序数据库 IOTDB 中，IOTDB 是一款聚焦工业物联网、高性能轻量级的时序数据管理系统，也是一款开源时序数据库，为用户提供数据收集、存储和分析等服务[3]。

在 DCS 初始化工具的客户端界面选择初始化的时间点，工具查询时序数据库获取机组该时刻的电功率、平均温度以及所有设备的状态，并写入数字孪生系统的共享内存中，供后续数据分析和初始化使用。

3.1.2. 数据分析和检索

数据分析过程中首先获取共享内存中当前电功率数据，将电功率和额定功率进行比较计算得到归一化功率。如归一化功率大于 40%，则从满功率向下寻找最接近该功率的 IC；如归一化功率小于 40%，则先依据功率和温度判断该过程是升功率或降功率，确定过程后再依据功率检索最接近 IC。整个过程如下图 3 所示：

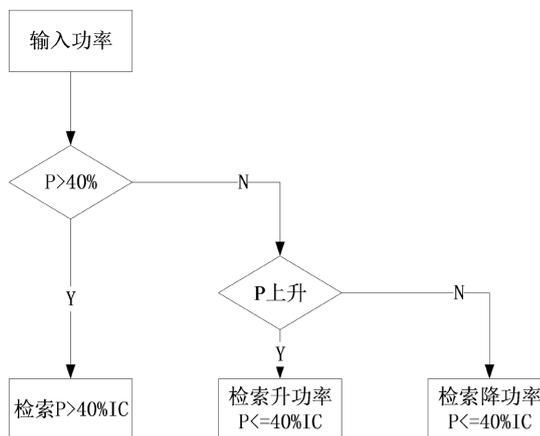


Figure 3. IC retrieval logic process

图 3. IC 检索逻辑过程

3.1.3. 数字孪生系统状态复位

通过数据分析和检索获取数字孪生系统中最接近的 IC 后, DCS 初始化工具通过仿真平台的外部接口复位该 IC, 此时, 数字孪生系统与机组达到较为相近的运行工况。

3.2. 初态分析

以福清核电 3 号机组为例, DCS 二层采用的是 ATOS 的 ADACS_N 系统, 该系统中设备状态(device state, 简称 DSTA)分为 9 类: 全开(启/合闸)、全关(停/分闸)、正在开、正在关、中间位置、开故障、关故障、中间位置故障、其他故障; 设备基本状态(basic device state, 简称 BSTA)分为 4 类: 全开(启/合闸)、全关(停/分闸)、中间位置、故障。两者之间的关系如表 1 所示:

Table 1. The corresponding relationship between equipment status and equipment basic status

表 1. 设备状态与设备基本状态对应关系表

设备状态	状态码	设备基本状态	基本状态码
全开(启/合闸)	0	全开(启/合闸)	0
全关(停/分闸)	1	全关(停/分闸)	1
正在开	2		
正在关	3	中间位置	2
中间位置	4		
开故障	5		
关故障	6		
中间位置故障	7	故障	3
其他故障	8		

ADACS_N 系统数据库中存储的设备状态码为“基本设备状态码”, 数字孪生系统的计算服务器也计算了设备 BSTA, 遍历数字孪生系统中所有设备, 获取 BSTA 并与机组当前时刻的设备状态进行比较, 即可得到待初始化设备清单, 机组设备 BSTA 为仿真模型目标状态。

3.3. 对象初始化

初始化对象按照 PO (即 process object: 过程对象类型) 可分为 AIR_OP_DAMPER、BINARY_ACTUATOR、BLOCK_VALVE、BLOCK_STP_VALVE、SOL_VALVE_FO、SOL_VALVE_FC、LOOP_CONTROL、LOOP_VALVE_FO、LOOP_VALVE_FC、SELECTOR、MULTI_COMMANDS 共 11 类[4], 为了简化模型, 将初始化对象抽象为如下 3 类(表 2):

Table 2. Initialization object classification table

表 2. 初始化对象分类表

操作类型	过程对象类型	操作命令	命令类型
普通开关类设备	AIR_OP_DAMPER		
	BINARY_ACTUATOR	CIN_1	开命令
	BLOCK_VALVE	CIN_2	关命令
	BLOCK_STP_VALVE	CIN_3	确认命令
	SOL_VALVE_FO	CIN_4	自动命令
	SOL_VALVE_FC	CIN_5	手动命令
调节阀		CIN_6	停止命令
	LOOP_CONTROL	CIN_1	开命令
		CIN_2	关命令
		CIN_4	自动命令
		CIN_5	手动命令
	LOOP_VALVE_FO	CIN_7	设定调节命令
	CIN_8	输出调节命令	
	AIN_O2	输出值	
	LOOP_VALVE_FC	AIN_S2	设定值
组控开关和选择器		CIN_1	Comm1A/SET
		CIN_2	Comm1B/RESET
		CIN_3	Comm1C/MODE1
	SELECTOR	CIN_4	Comm2A/MODE2
		CIN_5	Comm2B/MODE3
		CIN_6	Comm2C/MODE4
		CIN_7	Comm3A/MODE5
		CIN_8	Comm3B/MODE6
		CIN_9	Comm3C
	MULTI_COMMANDS	CIN_10	Comm4A
		CIN_11	Comm4B
		CIN_12	Comm4C

3.3.1. 普通开关类设备的初始化

对于普通开关类设备, 初始化之前记住数字孪生系统各 PO 的手/自动状态, 然后, 发送 CIN_5 命令把所有 PO 统一切到手动状态, 此时可以通过外部操作命令来控制设备。根据目标状态发送 CIN_1 或 CIN_2 命令打开或关闭设备, 最后将样机初始状态为自动的设备切回自动状态。初始化流程如图 4 所示。

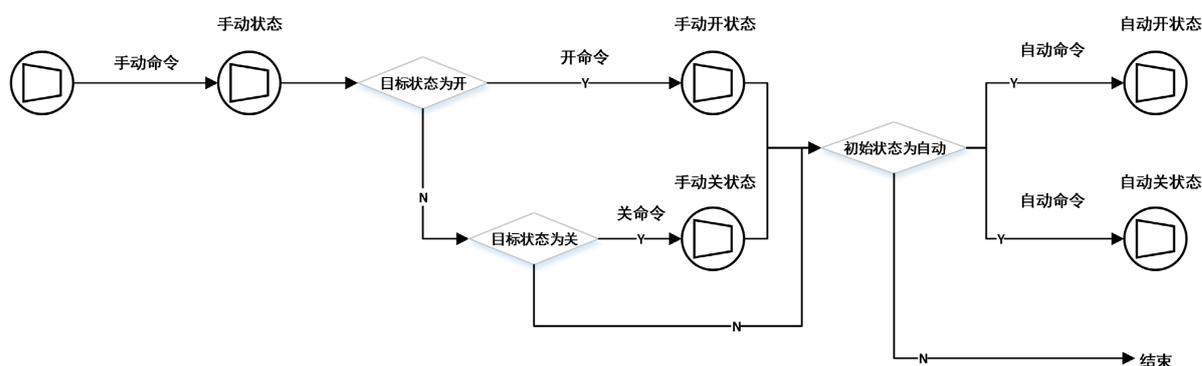


Figure 4. The flow chart of the initialization of ordinary switch equipment
图 4. 普通开关类设备初始化流程图

3.3.2. 调节阀的初始化

对于调节阀，根据 ADACS_N 系统历史数据存储机制，分为有目标阀位的调节阀和只有开关状态的调节阀两类[5]。在对调节阀进行初始化之前记住样机各 PO 的开/闭环调节状态，发送 CIN_8 命令把所有 PO 统一切换到开环调节状态。对于只有开关状态的调节阀，将阀位调到 0 或 100；对于有目标阀位的调节阀，将阀位调到目标阀位，然后仿真模型通过目标阀位计算出闭环调节模式下 PID 的设定值输入，以免调节阀切回闭环调节模式时 PID 模块产生扰动。最后，将样机初始状态为闭环调节的设备切回闭环调节状态。初始化流程如图 5 所示。

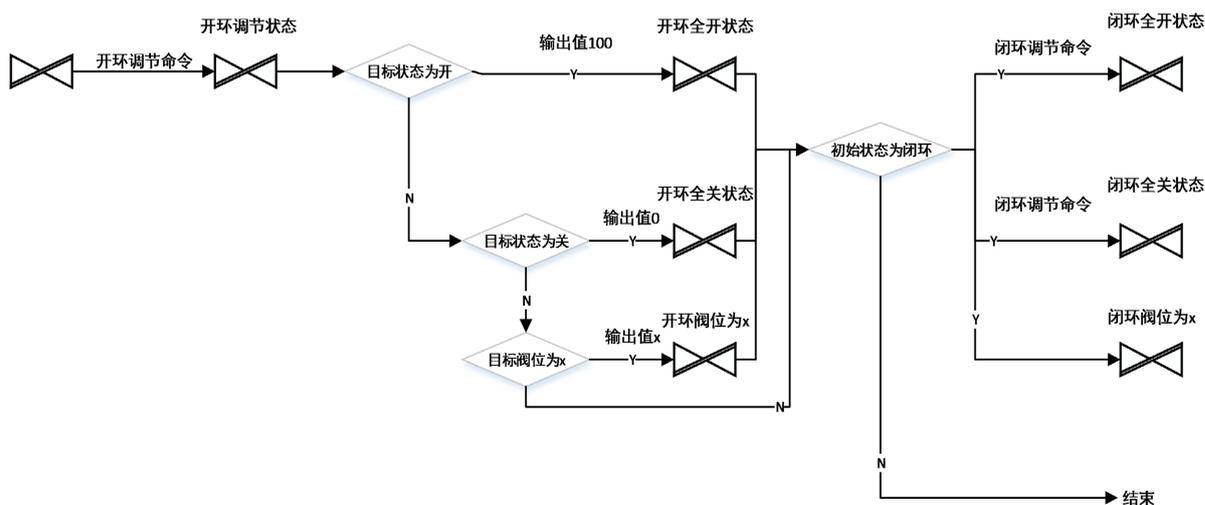


Figure 5. Flow chart of regulating valve initialization
图 5. 调节阀初始化流程图

3.3.3. 组控开关和选择器的初始化

对于组控开关(KG)和选择器(KC)的初始化，一般用于互为备用的设备的列间切换，不单独对 KC、KG 进行初始化。由于部分设备的开/关存在一些信号闭锁，需要通过 KC、KG 解除闭锁信号才能对设备进行操作，对于这种情况设计了配置文件处理此类包含复杂逻辑的 PO。配置文件包含操作对象、操作类型、前置条件和后置条件，初始化程序首先按照前置条件操作相应对象；然后对操作对象执行预定义的操作；最后按照后置条件操作相应对象。配置文件样式如表 3 所示：

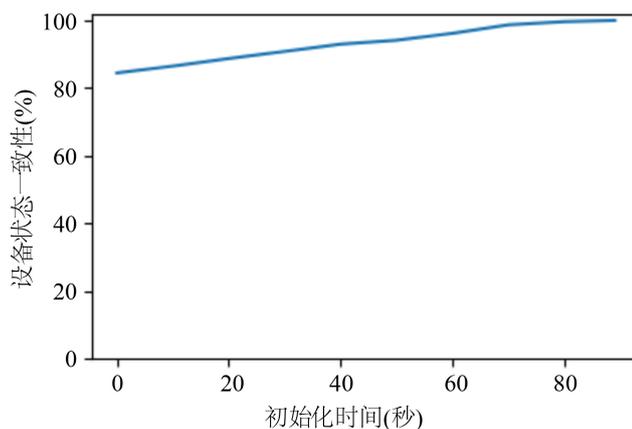
Table 3. Device initialization configuration table containing complex logic**表 3.** 包含复杂逻辑的设备初始化配置表

操作对象	操作类型	前置条件	后置条件
3CET101ZV	CLOSE	3CET020KC:201ZV	
3CET201ZV	OPEN	3CET020KC:201ZV	
3GFR011PO	CLOSE	3GFR111DB:DEBLOCK; 3GFR111PO:START; 3GFR010KC:MANUAL; 3GFR011PO:STOP; 3GFR010KC:111PO	3GFR010KC:AUTO
3GGR020ZV	OPEN	3GGR020KC:020ZV; 3GGR020KC:MANUAL	
3GGR120ZV	CLOSE	3GGR020KC:120ZV; 3GGR020KC:MANUAL	

4. 实验与分析

4.1. 初始化对象状态分析

实验选取福清核电 3 号机“100% FP 工况运行”为初始化目标,福清核电 3 号机组包含 1345 个设备,在初始化之前,其中 1136 个设备状态与数字孪生系统 100% FP 标准工况一致。在实验过程中,记录机组与数字孪生系统设备状态的一致性,结果如图 6 所示。

**Figure 6.** Device state consistency during initialization**图 6.** 初始化过程中设备状态一致性

4.2. 数字孪生系统状态分析

为了验证 DCS 初始化后,数字孪生系统的总体运行状况,选取了 M310 机组中与运行指标紧密关联的 29 个重要参数,记录经初始化后这些参数与机组 100%FP 工况下相关参数的偏差值和偏差比例,结果见表 4。

Table 4. Important parameter deviation table**表 4.** 重要参数偏差表

序号	变量中文名	机组变量值	模拟变量值	偏差值	偏差比例
1	反应堆热功率	2831	2893.70	62.7	1.79%
2	1 环路平均温度	309	309.333	0.333	0.48%

Continued

3	2 环路平均温度	309.5	309.428	-0.072	-0.10%
4	3 环路平均温度	309.5	309.642	0.142	0.20%
5	1 环路冷段温度	293	292.025	-0.975	-0.28%
6	2 环路冷段温度	293.7	292.214	-1.486	-0.42%
7	3 环路冷段温度	293.2	292.645	-0.555	-0.16%
8	1 环路热段温度	325.1	326.674	1.574	0.45%
9	2 环路热段温度	326	326.672	0.672	0.19%
10	3 环路热段温度	325.7	326.672	0.972	0.28%
11	1 环路冷却剂流量	97.95	98.425	0.475	0.40%
12	2 环路冷却剂流量	99.34	98.366	-0.974	-0.81%
13	3 环路冷却剂流量	99.49	98.265	-1.225	-1.02%
14	稳压器压力	15.41	15.523	0.113	1.62%
15	稳压器液位(冷态标定)	-2.032	-2.504	-0.472	-4.82%
16	SG1 液位	-0.007	-0.243	-0.237	-6.58%
17	SG2 液位	-0.004	-0.225	-0.221	-6.13%
18	SG3 液位	-0.006	-0.237	-0.231	-6.41%
19	SG1 主给水流量	1878	1901.68	23.68	0.97%
20	SG2 主给水流量	1900	1933.39	33.39	1.37%
21	SG3 主给水流量	1887	1910.43	23.43	0.96%
22	SG1 辅助给水流量	0	0	0	0.00%
23	SG2 辅助给水流量	0.988	0	-0.988	-0.62%
24	SG3 辅助给水流量	0	0	0	0.00%
25	SG1 主蒸汽流量	1890	1879.02	-10.98	-0.45%
26	SG2 主蒸汽流量	1889	1910.58	21.58	0.88%
27	SG3 主蒸汽流量	1903	1887.53	-15.47	-0.63%
28	蒸汽母管压力	6.361	6.564	0.203	2.03%
29	发电机电功率	1073	1089.06	16.06	1.40%

5. 结论

经以上分析,使用本DCS初始化技术能够使初始化后的数字孪生样机设备状态与机组完全一致,DCS初始化后,数字孪生系统保持稳定,且重要运行参数的偏差在合理范围内。未来结合工艺系统、堆芯、热工、电气等子系统的初始化技术,能够最终实现核电数字孪生系统仿真模型状态跟踪。

参考文献

- [1] 潘保林, 邹金强, 毛志新, 等. 数字孪生技术在核电站的应用分析[J]. 中国核电, 2020, 13(5): 587-591.
- [2] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., *et al.* (2018) Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51, 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

- [3] Stouffer, K., Michaloski, J., Russell, B., *et al.* (1993) ADACS-An Automated System for Part Finishing. *Proceedings of IECON 93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Maui, 15-19 November 1993, 581-586.
<https://doi.org/10.1109/iecon.1993.339012>
- [4] 王建民. 工业大数据软件面临的挑战及应用发展[J]. 信息通信技术与政策, 2020(10): 1-5.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9217.2020.10.001>
- [5] 白江斌, 李玉荣. 核电站 DCS 系统中调节阀的控制研究及改进[J]. 科技传播, 2014(7): 84-85.