

CNIC-01838

QNPC-0012

# 秦山第三核电有限公司停堆参数监测系统设计与应用

苏国权 刘望天 俞亦军 熊伟华

(秦山第三核电有限公司,浙江海盐,314300)

## 摘 要

介绍了秦山第三核电有限公司停堆参数监测系统的设计、调试和应用的情况。阐述了利用 DCS 技术实现核电站停堆参数的监测,并实现了各停堆参数的采集、实时传送、存储、报警、查询等功能。停堆参数监测系统的应用大大改进了核电站的状态监控能力和瞬态分析能力,提高了核电厂的安全性和经济性。

**关键词:** 核电站 停堆参数监测 数据采集传送和存储

**The Application and Design of Distributed Control System  
in Reactor Shutdown System of Qinshan Phase III**  
(*In Chinese*)

SU Guoquan LIU Wangtian YU Yijun XIONG Weihua  
(Third Qinshan Nuclear Power Company Lit. , Haiyan, Zhejiang, 314300)

ABSTRACT

The design, commissioning and running of the reactor trip parameter monitoring system used in Qinshan Phase III are introduced. The applying technology of Distributed Control System realized trip parameter monitoring and realized the function of trip parameters quick data acquisition, transferring, saving, alarm, query. The applying of trip parameters monitoring system improved the abilities of plant status monitoring and event analyzing, and increased the security and economy of nuclear power plant.

**Key words:** Nuclear power plant, Monitoring of reactor trip parameters, Data acquisition, Data transferring and saving

## 引言

近年来,随着我国国民经济及社会的发展,各地都相继出现了用电紧张的情况。为缓解这种不利局面,国家一直致力于扶植电力系统行业的发展。这其中,核电作为一种清洁、稳定、高效的能源,正日益受到人们的青睐。目前我国正在大力发展核电事业,计划在今后 15 年每年有两到三台核电机组开工建设,相当于两个秦山第三核电有限公司;到 2020 年中国核电装机容量将达到 3 600 万千瓦,要建成 27 个百万千瓦级核电机组。

核电行业是一种安全要求非常高的行业,要保证核电站安全可靠地运行,核电站的仪表和控制系统的性能及人机接口就显得尤为重要。目前国内核电站的仪控系统大部分都是以模拟量组合单元仪表为主的控制系统,这类控制系统所需要的仪表控制器件数量多,大部分采用手动操作,数据显示精度低且控制困难,不利于人机交流。

秦山第三核电有限公司是我国首座商用重水堆核电站,采用加拿大成熟的 CANDU6 核电技术建造,它将为下一代核电站开发的大屏幕数据显示系统(PDS)应用到秦山第三核电有限公司,大大改善主控室的人机界面起到良好的借鉴作用。秦山第三核电有限公司核反应堆配备有工作原理完全不同的两套独立的停堆系统,分别称为一号停堆系统(SDS-1)和二号停堆系统(SDS-2)。SDS-1 通过快速向堆芯插入 28 根镉棒实现停堆<sup>[1]</sup>;SDS-2 通过快速向堆芯注入 6 罐浓度为  $8\ 000 \times 10^{-6}$  的硝酸钆毒液实现停堆<sup>[2]</sup>。两套停堆系统在电站工况异常情况下动作,快速引入负反应性使反应堆迅速停堆。两个停堆系统的部分停堆参数送入可编程数字比较器(PDC)进行运算,由 PDC 根据运算结果决定是否触发停堆。但 PDC 没有数据显示和存储功能,而且停堆参数也没有送入电站控制计算机(DCC)和 PDS 进行数据的采集、处理以及显示、存储,而是仅用模拟指针表在主控室和第二控制室提供人机接口。从机组调试、试运行、商业运行的实践分析,发现停堆系统的这种处理和显示数据方式存在以下不足:

(1)模拟指针表精度低(约为 2%),尤其是电压型指针表存在漂移、与隔离模块阻抗不匹配,存在非线性误差,指针易卡涩等问题,故障率较高。操纵员易产生人为读数误差,不利于精确判定机组运行情况。特别是目前每日两次的局部区域高中子(ROP)回路校验过程中,采用现场测量的方式评估哪些回路需要重新校验,给检修人员带来了额外的工作量。

(2)秦山 CANDU6 机组的特点之一就是不停堆换料,在新燃料装入燃料通道时,由于正反应性的引入和燃料棒束在燃料通道内移动,以致在换料过程中会引起局部区域的功率(ROP)短时间内有较大幅度的上升[大约 5%~14%FP(满功率)]。现有 ROP 指针表不能满足换料期间 0.1%FP 高精度要求,容易导致操纵员的误判,从而存在较高的误停堆风险或不必要的降功率运行。

(3)曾发生多次因为停堆参数瞬时触发,引起反应堆保护系统单通道脱扣事件,但因缺乏历史数据记录和趋势分析手段,其根本原因多数没有分析到位,最后只有采用保守决策将整个停堆参数测量回路设备全部更换。

另外,有时电站工况会发生异常变化,通过对停堆参数进行采集、监测和报警,可以在参数触发停堆前提醒操作员注意,采取必要措施使电站工况恢复正常,避免造成不必要的停堆。

本文首先分析了秦山第三核电有限公司停堆参数采集、监测、存储功能的需求,在此基

基础上提出了停堆参数监测系统的总体设计方案,并具体介绍了监测系统的关键部件的实现细节以及系统的调试情况。

## 1 停堆参数监测系统的功能需求

在设计停堆参数监测系统时,根据停堆系统的特点及作用主要考虑了以下需求:

- (1) 参数监测系统的独立性,即不能影响停堆系统的任何功能;
- (2) 对停堆系统的数据实现高速采集;
- (3) 友好的,智能化的人机界面,方便运行人员对于数据进行监视,在异常工况下,能方便的提醒运行人员;
- (4) 所有数据可以进行高精度的记录以及方便查询;
- (5) 两个停堆系统的参数监测互不影响;
- (6) 停堆参数监测系统可以实现自我诊断和报警。

根据以上需求,每个停堆系统配置一套独立的参数监测系统,并实现下列功能:

(1) 采集 SDS-1 和 SDS-2 的模拟量和开关量输入信号,采样周期为 20 ms 或 100 ms。并进行数据处理和记录,数据记录在参数监测系统中至少保存 72 h。所有模拟量及开关量实现点点隔离。

(2) 实现反应堆局部区域超功率脱扣(ROPT)裕量计算,在裕量小于给定的值时,输出报警信号到主控室报警窗。(任意两个回路裕量 $<6\%FP$ ,或任意单个回路裕量 $<4\%FP$ )

(3) 经采集和处理的模拟量和开关量信号按照与 PDS 定义的通信协议,实时将所有数据发送给 PDS。PDS 可以按照模拟仪表盘和趋势图的显示方式显示所采集的数据。参数监测系统具有 20 ms 趋势显示、流程图以及报警显示功能,在 PDS 发生故障时,参数监测系统依然可以独立完成数据采集、处理、显示和存储功能。停堆参数监测系统的关键部件(如通信网络、供电系统等)必须具备冗余功能。

(4) 停堆参数监测系统的每个机笼采集一个停堆系统单通道的参数,机笼之间实行隔离。参数监测系统的所有模拟量输入信号都取自停堆系统的光电耦合的隔离模块之后,这样停堆参数自行运算,不受外界影响,同时保证了不影响停堆系统的功能。数字量输入信号取自现场的备用继电器触电,这样不影响停堆的逻辑。

## 2 停堆参数监测系统的设计

参数监测系统的系统框架如图 1 所示。SDS-1 和 SDS-2 数采系统分别使用 3 个数采器来采集前端输入的 3 个通道的信号。每

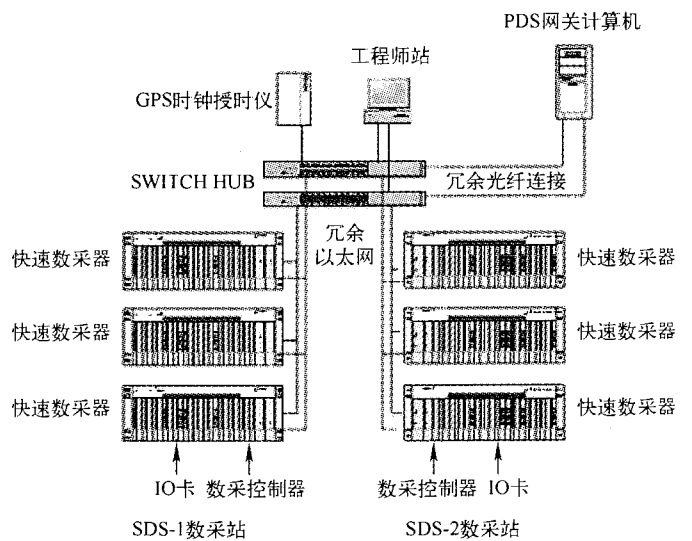


图 1 停堆参数监测系统的系统框架

个数采装置包括数采控制器、AI卡和DI卡，每个数采系统还有1个DO点实现报警输出。SDS-1和SDS-2数采系统共用1个工程师站，并通过1个PDS网关计算机将采集数据送到PDS显示系统显示。另外SDS-1和SDS-2数采系统共用一个GPS授时仪实现系统时钟与GPS时钟同步。参数监测系统的快速数采器采用浙江中控技术股份有限公司最新的快速数据采集技术(ECS-100)，并结合秦山第三核电有限公司对于参数监测系统的具体要求，进行了设计修改。

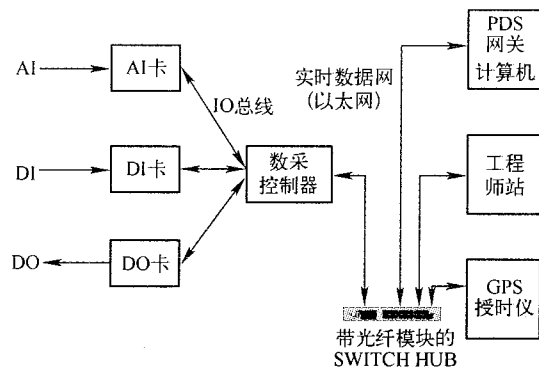


图2 参数监测系统的内部结构

如图2所示，数采器分为数采控制器和AI,DI,DO三类IO卡件。

数采控制器实现以20ms和100ms的采样周期对数据进行采集以及对ROPT裕量值进行计算、记录和发送，并具备高精度实时时钟，每5秒通过简单网络时间传输协议(SNTP)与全球定位系统(GPS)授时仪时钟同步一次，保证系统时间与GPS同步。AI卡采用ECS-100系统中最新快速AI采集技术，实现高速AI采集，每块卡件实现6路隔离AI采集；DI是4路点点隔离卡；DO卡是16通道卡件，通道之间不隔离，外接继电器隔离。

工程师站采用DELL服务器，安装在机柜中。工程师站软件是在目前ECS-100系统最新软件AdvanTro-Pro2.0的基础上改进而来，可实现系统的组态，并增加了秦山第三核电有限公司停堆参数监测系统特有的20ms采样时间间隔的历史数据显示功能，以及信号点的组态功能。另外工程师站软件还具备历史数据导出功能：历史数据可以导出并存成文本文件，用户可以对历史数据进行统计和分析。

GPS授时仪采用法国LEDI公司设备。GPS授时仪一方面接收IRIG-B硬件时钟信号，实现授时仪本身与UTC时钟的同步，另一方面具备以太网接口，提供NTP时钟服务器功能。数采站和工程师站都通过以太网连接到GPS授时仪，使用SNTP协议进行时间同步。

机柜设计基本原则是在ECS-100系统机柜的基础上，按照抗震性要求进行修改设计。机柜的外壳部分由具备核级(1E级)仪表柜生产能力的苏州东仪公司提供，保证了机柜的抗震性。

停堆参数监测系统与PDS网关计算机之间采用光纤连接，并且双网冗余通信，通信协议采用UDP/IP协议基础上的特定UDP端口的自定义命令。

### 3 数采控制器的设计

数采控制器是参数监测系统的核心器件，如图2所示，数采控制器下连IO总线，与IO卡件通信，上接实时数据网，与工程师站、GPS授时仪、PDS网关计算机通信。数采控制器的功能包括：

- (1) 实现与工程师站组态软件、诊断软件、监控软件的通信；
- (2) 实现SNTP协议客户端功能，与GPS授时仪时钟同步；
- (3) 实现与AI和DI卡20ms间隔的周期通信；

(4)每 500 ms 按用户要求格式将历史数据发送给 PDS 网关计算机和工程师站;

(5)实现 ROPT 裕量计算、报警输出计算等运算。

### 3.1 硬件结构

数采控制器的硬件结构如图 3 所示,包括处理器部分、电源部分、WDT 电路、冗余逻辑切换及冗余通信电路、实时时钟电路、多串口通信电路、以太网通信电路、点灯和 IP 地址开关电路。

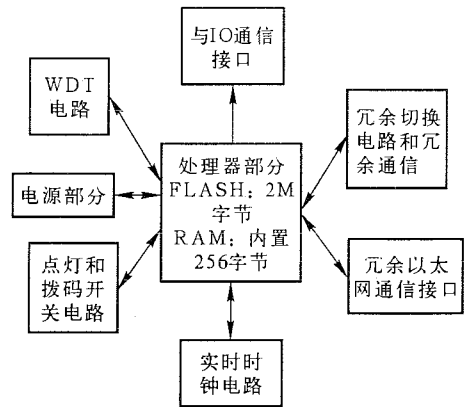


图 3 数采控制器的硬件结构

### 3.2 软件结构

数采控制器的程序采用 NUCLEUS 嵌入式实时操作系统作为底层软件,整个软件框架如图 4 所示。

数采控制器的主要软件模块有:

(1)初始化模块:进行各模块的初始化,进行各外设(串口、中断等)的初始化;

(2)通信接口:包括与以太网通信接口以及 IO 卡件通信接口;

(3)PDS 算法运算模块:负责进行 PDS 数据组帧。RTC 每隔 500 ms 产生中断,触发该模块执行。数据组帧完成后,向通信接口发送消息,通知通信模块向 PDS 发送数据;

(4)时钟同步模块:通过 SNTP 协议实现数采控制器与时钟服务器的时钟同步。

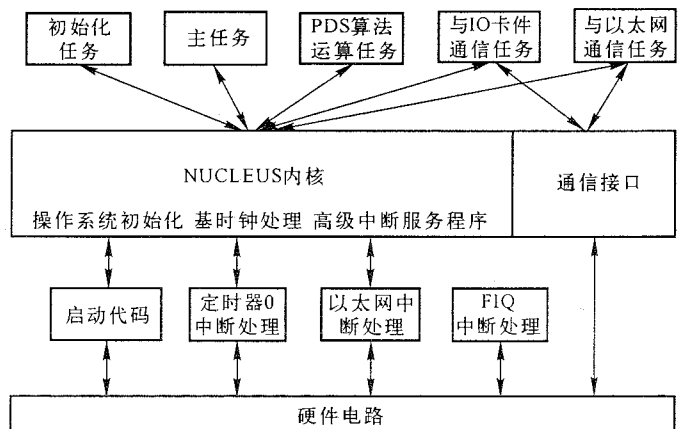


图 4 数采控制器的软件结构

## 4 数据在 PDS 上的显示、存储

停堆参数监测系统的所有数据都传输到 PDS 统一显示和存储。在主控室 PDS 操纵员终端计算机的触摸屏上,有两个菜单调取两个停堆系统 ROPT 裕量显示图分别为:SDS1 DISPLAY 以及 SDS2 DISPLAY,操纵员选择这两个菜单,对应的两个停堆系统的 ROPT 裕量,以及通道功率会直观地显示在大屏幕上或者液晶屏上。在正常情况下,画面上所有的参数均为灰色,一旦某一个 ROPT 裕量值低于 6%FP,则该 ROPT 的参数会变成黄色,如果低于 4%FP,则参数会变成红色,可以非常醒目地提醒运行人员参数低于限值。如果对应的某个参数处于量程范围之外,则该参数会变成红色,同时前面会显示一个红叉,以提醒运行人员该参数超量程而非低于限值。从而使运行人员可以快速而准确地获得 ROPT 裕量的状态。同时运行人员也可以从 PDS 上方便调出除 ROPT 裕量之外的 111 个停堆系统模拟量参数的趋势图和棒状图。图 5 是 PDS 大屏幕上显示的 SDS-1 的功率以及 ROPT 裕量监

视图。

与 PDS 的其他数据一样,停堆参数监测系统的所有数据也实时通过 PDS 传输到 PI 系统进行永久保存。技术人员可以通过办公网络实时地查看这些数据,可以及时地分析和评估两个停堆安全系统的运行情况。

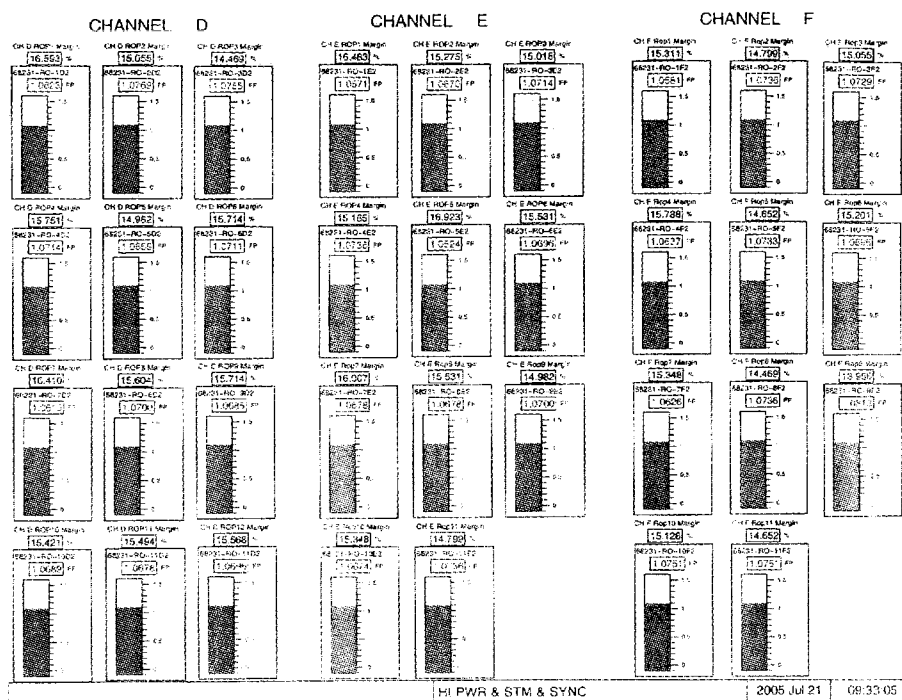


图 5 SDS-1ROPT 裕量显示图

## 5 测试和联调

### 5.1 数据监测系统软硬件测试

#### 5.1.1 软件测试

系统软件的设计是在 Pro2.0 的基础上展开的。针对系统数据的快速采集、记录和查询,软件的测试系统对以下五个部分进行了重点测试,结果满足设计要求:

- (1)历史数据库组态;
- (2)趋势画面的组态;
- (3)快速组态部分的编译和下载;
- (4)快速历史数据库;
- (5)监控历史数据的查询和显示。

#### 5.1.2 硬件测试

(1)六通道模拟量输入卡

- 1)精度测试结果满足 $\leq 0.1\%$ 满量程,分辨率至少为 12 位+符号位以上。
- 2)LED 指示及诊断测试结果在各种状态下显示正常。

3)数据采集及处理测试结果模拟量数据采集周期为 20 ms 和 100 ms 时,系统运行正常;存储时间大于 72 h。

4)输入阻抗的测试结果 $\geq 1\text{M}\Omega$ 。

5)容错能力测试结果满足: i) 带电插拔卡件时,卡件本身不会损坏,同时也不影响其他卡件的正常工作; ii) 卡件本身故障时,不影响其他卡件的正常工作,也不影响系统的正常工作。

6)过流过压保护功能:通过在卡件信号输入端误加入 250VAC 电压(峰峰值),结果 i) 卡件本身的自我保护功能(如每个通道的 TVS 管,保险丝等)正常; ii) 该误操作不会损坏系统。

7)回路测量功能:用 FLUKE(型号 741B)仪作信号源,输出信号接到模入卡件通道上,信号正常后,突然把通道回路断开,结果 i) 在 1 秒之内降为 0VDC,断开回路; ii) 输出值超出高限,系统能够给出报警信号。

8)抗共模干扰能力测试:把共模信号发生器(包括交流变压器等)输出的正端接在卡件通道的一端,负端接地,同时用 FLUKE 仪作信号源,和共模信号并接到卡件上,共模干扰抑制比结果 CMRR $\geq 120$  dB。

9)抗串模干扰能力测试:把串模信号发生器产生 1 V/50 Hz 的交流电压加在一个 8.2  $\Omega$  电阻上,产生一个小的交流电流,串接在模入卡件的信号输入端,同时用 FLUKE 作信号源,和串模信号串联输入到卡件中,串模干扰抑制比结果 SMRR $\geq 60$  dB。

10)电气安全性试验: i) 绝缘电阻测试结果为绝缘电阻 $> 10\text{M}\Omega$ ; ii) 绝缘强度测试结果为绝缘强度 $> 500\text{VAC}/60\text{s}$ 。

#### (2)四路开关量输入卡

1)LED 指示及诊断测试:结果在各种状态下显示正常。

2)触点输入范围: i) 干触点输入 ON 状态,阻抗值 $\leq 1\text{k}\Omega$ ; ii) 干触点输入 OFF 状态,阻抗值 $\geq 100\text{k}\Omega$ 。

3)查询电压范围的测试:卡件正常工作时,查询电压的工作范围为 48VDC(+10%~ -20%)。

4)容错能力测试: i) 带电插拔卡件时,卡件本身不会损坏,同时也不影响其他卡件工作; ii) 卡件本身发生故障时,不影响其他卡件工作,也不影响系统正常工作。

5)过流过压保护功能:用 250VDC 直流电源产生 250 V 的电压,接入卡件通道的信号输入端,通过模拟误加入 250 V 电压,结果卡件本身的自我保护功能(如每个通道的 TVS 管,保险丝等)正常。

6)数据采集及处理功能:通过数据采集记录,让开关量状态在 ON 和 OFF 之间不断变化,开关量数据采集周期在 20 ms 时运行正常;数据采集有存储功能,存储时间大于 72 h。

7)电气安全性试验: i) 绝缘电阻测试结果为绝缘电阻 $> 10\text{M}\Omega$ ; ii) 绝缘强度测试结果为绝缘强度 $> 500\text{VAC}/60\text{s}$ 。

#### (3)十六路开关量输出卡

1)卡件 LED 指示及诊断测试:LED 指示及诊断测试结果为在各种状态下显示正常。

2)开关量输出功能测试:通道输出 ON 状态时,通道指示灯亮,继电器闭合;通道输出 OFF 状态时,通道指示灯灭,继电器断开。



3)容错能力测试: i) 带电插拔卡件时,卡件本身不会损坏,同时也不影响其他卡件的工作; ii) 卡件本身发生故障时,不影响其他卡件的工作,也不影响系统正常工作。

4)过流过压保护功能:用 250VDC 直流电源产生 250 V 的电压,接入卡件通道的信号输入端,通过模拟误加入 250 V 电压,结果卡件本身的自我保护功能(如每个通道的 TVS 管,保险丝等)正常。

5)电气安全性试验: i) 绝缘电阻测试结果为绝缘电阻 $>10\text{ M}\Omega$ ; ii) 绝缘强度测试结果为绝缘强度 $>500\text{VAC}/60\text{ s}$ 。

### 5.1.3 参数监测系统测试

(1)20 ms 和 100 ms 采样周期的测试:波形发生器输出三角波,电平从 0 V 升至 5 V 或从 5 V 降至 0 V 时间为 500 ms,给参数监测系统的模拟量输入通道进行采集,结果数据点都呈现递增或递减趋势。

(2)开关量 20 ms 采样周期的测试:波形发生器分别输出方波,高电平(5 V)和低电平(0 V)均为 100 ms,结果观察到 5 个连续的 ON 信号点,其中任意相邻两点时间标签差值为 20 ms;紧接着 5 个连续的 OFF 信号点,其中任意相邻两点时间标签差值为 20 ms。

(3)电磁兼容性(EMC):电压短时中断抗扰度实验:供电电压短时中断 100%,中断时间为 10 ms,结果不影响系统的工作;电快速瞬变脉冲群抗扰实验:在 I/O 信号、数据和控制端口,电压峰值小于 1 kV,重复频率小于 5 kHz,试验结果不影响系统的工作;静电抗扰度实验:控制系统的外壳在 6 kV 以下的接触静电放电,试验结果不影响系统的工作;射频电磁场辐射抗扰度实验:用功率为 5 W、频率为 80~1 000 MHz 的步话机作干扰源,距敞开柜门的控制系统机柜 1.5 m 处,结果不影响控制系统的工作;射频场感应的传导骚扰抗扰度实验:在来自射频发射机电磁场的未调制骚扰信号作用下,其频率范围为 150 kHz~80 MHz,开路试验电平(e. m. f.)为 3 V,试验结果不影响系统的工作。

(4)正弦波信号采集:通过函数信号发生器给模拟量输入卡件输入正弦波信号,结果在快速历史趋势中可以看到的正弦波曲线。

## 5.2 现场系统联调

现场联调按照下面九个方面进行测试和考核,结果满足要求:

(1)参数监测系统的通道单回路调试:完成参数监测系统开路和短路测试,以确认参数监测系统满足与停堆系统的隔离;每个回路信号精度测量,满足误差 $\leq 0.3\%$ (信号是由隔离模块输出端加模拟信号,包括信号源,电缆,取样电阻及参数监测系统误差的总和)。

(2)ROPT 回路裕量报警调试:每个回路外加可调模拟信号,验证单个回路 ROPT 裕量 $<4\%$ FP 时,产生相应的 DO 报警,PDS 红色报警,主控室窗报警;两个回路外加可调模拟信号,验证单个回路 ROP 裕量 $<6\%$ FP 时,产生相应的 DO 报警,PDS 黄色报警,主控室窗报警。

(3)趋势显示调试:对趋势画面和快速趋势画面进行设置,验证可以按照要求的显示周期:20 ms,100 ms,1 s,2 s,4 s 和 60 s 进行显示;测试是否可以在 72 h 内,选择任一时间段进行历史数据的查询显示。

(4)PDS 与参数监测系统的通信调试:按照系统配置,完成组态,并下载到主控制器中运行;将主控制器通过交换机与 PDS 服务器连在同一个网络中,在 PDS 显示系统中,观察到模拟量和数字量的信息。

(5)GPS 时钟同步调试:操作站、控制站时钟能够被 GPS 服务器同步,使数据与电站时

钟同步。

(6)冗余性能调试:关闭系统任意一个电源,系统工作正常,信号采集正常;断开主控制器任意一个网线,系统工作正常,信号采集正常。

(7)可维护性:带电依次插拔各模拟量数字量卡件、主控制器以及网线,在系统整体诊断画面中,能够正确诊断显示出具体的“故障”卡件及网络。

(8)负荷测试:在故障诊断画面中,控制器的监控程序运行时间,主控制器的监控程序运行时间与控制周期比值 $\leq 40\%$ ;在网络监视软件中,网络负荷为 $15\%$ 。

(9)PDS数据参数与现场指示表比较:PDS中来自参数监测系统的参数与停堆系统现场指示表比较结果 $< 2\%$ ,满足要求。

## 6 结束语

秦山第三核电有限公司停堆参数监测系统投入使用之后,对于电厂的安全与经济都有着重要的意义:

(1)大大节省了运行人员的人力、物力。以前在换料期间,运行都需要有专门人员持续监测盘台的模拟仪表,但由于模拟仪表的不准确性,需要人工判断 ROPT 裕量。而数据采集系统投入使用之后,操纵员不需有专门人员到模拟盘台去持续监测仪表,而只要在大屏幕上调出停堆参数显示画面。当参数超过限值或者异常之时,停堆参数监测系统会自动产生报警,并通过参数颜色变化以及窗口报警系统的声光报警提示运行人员。

(2)提高了停堆系统数据显示的准确性,降低了运行人员的出错概率。

(3)所有停堆参数都被永久地存储,而且可以方便地进行查询,为分析和评估停堆的状况提供了数据保障。

(4)提高了电站的经济性。在参数监测系统未投入之前,由于模拟仪表的精度不够,在换料之时,运行人员一般都要手动降功率到 $96\%FP$ ,来确保反应堆安全。参数监测系统投入使用之后,在换料时,由于可以准确地监测 ROPT 裕量,所以无须手动降功率,提高了电厂的经济性。

(5)减少了维修人员现场 ROPT 标定的工作量,减少了设备损坏的概率。

应用于秦山第三核电有限公司的停堆参数监测系统,采用了最新的 DAS 技术,提高了秦山第三核电有限公司仪控系统的数字化水平。参数监测系统在 2004 年底完成设计,2005 年 2 月 2 日,样机在秦山第三核电有限公司实验室投入测试。测试结果表明,数采系统的功能达到要求,且具有测量精度高,数据传输的可靠性高,可维护性高,容错性强,稳定性好,可扩展性强,数据采样时间易于调整等特点,并取得了很好的控制效果。2005 年 7 月 20 日,投入现场运行后,为操作员提供了更精确的数据显示,在换料过程中也不会因为 ROP 读数不准确,保守地降功率运行,提高了秦山第三核电有限公司的经济效益,同时停堆参数的精确显示也提高了停堆系统的可靠性。并为核电站开展停堆参数监测开辟了思路。

## 参 考 文 献

- 1 Aanad A. SDS-2 Design Manual 98-68300-DM-001(REV. 5)
- 2 Morgan C L. SDS-1 Design Manual 98-68200-DM-001(REV. 3)