

# 快中子临界装置计算机在线测量系统设计

李 勤, 白忠雄, 罗军益, 肖建国, 胡 倩

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 基于虚拟仪器、现场总线控制等技术, 设计、研制和应用了某两套快中子临界装置的计算机在线测量系统。该系统可实时监测温度、功率、增殖、周期、反应性、中子注量等状态、参数, 提高了监测自动化水平, 改善了人因工程特性。

**关键词:** 快中子临界装置; 计算机在线测量系统; 虚拟仪器; 现场总线控制

中图分类号: TP29 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0413-05

## Design of Computer Measurement System on Fast Neutral Critical Assembly

LI Meng, BAI Zhong-xiong, LUO Jun-yi, XIAO Jian-guo, HU Qian

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The computer measurement system was developed based on virtual instrument and fieldbus control system (FCS) technology and applied to two fast neutral critical assemblies. It can monitor temperature, power, proliferation, period and reactivity.

**Key words:** fast neutral critical assembly; computer measurement system; virtual instrument; fieldbus control system

随着微电子技术、通信技术和信息技术的迅猛发展, 以及其在一般工艺过程中的广泛应用, 以计算机技术为核心的数字化已成为研究堆的仪表与控制系统演化的潮流和今后必然的发展趋势。近年来, 国内外新建和改建的实验堆和研究堆基本采用了数字化仪控技术。本文介绍具备计数率、功率、周期、反应性、温度、传动信息等状态参数实时监测功能的快中子临界装置计算机在线测量系统的设计。

## 1 总体设计

### 1.1 结构

计算机在线测量系统可分为监测层和管理

层。监测层包括堆物理参数监测站、操纵员站、堆状态监测站。管理层包括值长站、大屏幕控制站。监测层通过 CAN 网络和 GPIB 总线实现与各现场站的通讯, 以实时监测逻辑连锁条件信号和堆物理参数。管理层通过以太网与监测层通讯, 获取快中子临界装置主要实时信息, 并通过大屏幕电视显示系统加以显示。系统结构与信号接口示意图示于图 1。

### 1.2 组成

硬件构成与主要功能列于表 1。不同工作站单元通过读取配置文件启动不同软件模块, 以实现相应功能。

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-08-30

作者简介: 李 勤 (1975—), 男, 四川安县人, 副研究员, 硕士, 从事反应堆测量控制系统研究

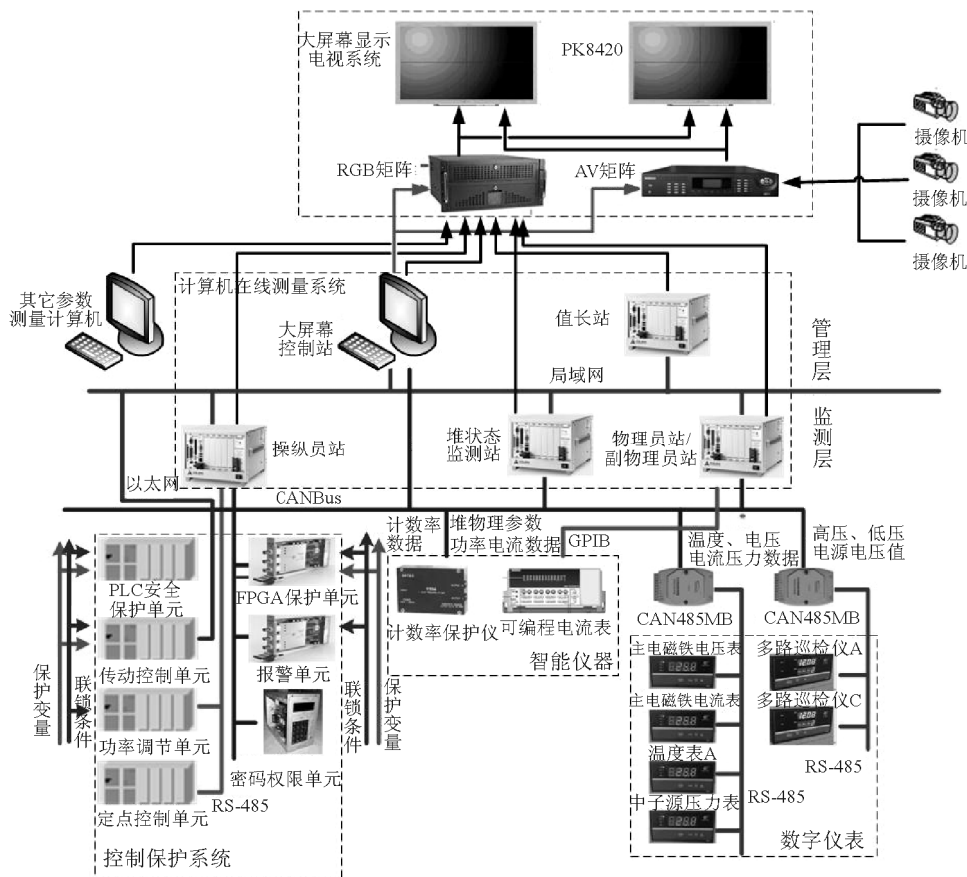


图1 计算机在线测量系统结构与信号接口

Fig. 1 Schematic structure of computer measurement system

表1 硬件主要功能

Table 1 Hardware main function

结构	工作站单元	主要功能
监测层	物理员站、副物理员站	周期反应性、增殖反应性、温度、功率、中子注量测量，棒位外推
	操纵员站	报警光字牌、传动位置显示
	堆状态监测站	在线巡检，温度显示，显示功放放大器电压、计数率保护仪频率、功调功率，中子注量计算，在线巡检
管理层	值长站	集中监测堆重要参数与信息、显示监测层各站信息、数据存取管理查询
	大屏幕控制站	活性区及机械装置动作 3D 实时演示、大屏幕系统控制以及界面整合显示、活性区视频在线管理存储、录音

软件包括通讯、数据处理、人机界面、数据库等模块，其结构示于图2。

## 2 软件设计

### 2.1 开发环境

软件适用于操作系统 Win2000、WinXP。采用 LabView 软件平台开发主要软件模块，采用 VC++和 OPENGL 接口开发 3D 模型演示软

件模块。

### 2.2 软件模块设计

**2.2.1 通讯模块** 监测层通过 CAN 网络与安全保护单元、报警单元<sup>[1]</sup>、密码权限单元<sup>[2]</sup>、计数率保护仪<sup>[3]</sup>、脉冲棒控制单元等基于 SOPC 技术设计的现场站和数字显示器、多路巡检仪通讯<sup>[4]</sup>，通过 OPC 服务与各传动定点控制单元、功率调节单元和传动逻辑控制单元的 PLC 通

讯，通过 GPIB 总线与可编程电流表通讯。监测层、管理层各单元通过局域网 DataSocket 通讯实现数据共享。CAN 通讯是通讯模块的核心，其流程示于图 3。

**2.2.2 数据处理模块** 数据处理模块实现功率、增殖反应性、周期及其相应反应性、累计中子注量值、棒位外推等计算。

**2.2.3 数据库与报表输出模块** 数据库包括堆状态、电源电压、按钮开关、堆物理参数等信息。通过 Database Connectivity Toolkit 实现堆运行的无纸记录和参数值和时间索引的查询、打印等数据库功能，并通过 Report Generation Toolkit 生成 word 报表文件。温度、周期、功率数据量大，故保存原始数据与相关信息至 tdms 二进制格式文件中。

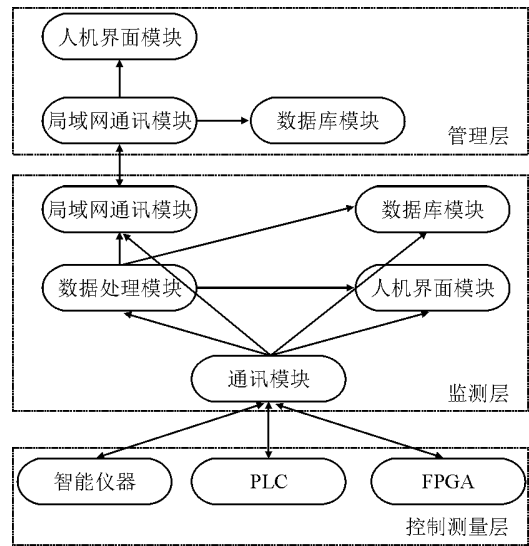


图 2 软件模块结构

Fig. 2 Schematic structure of software

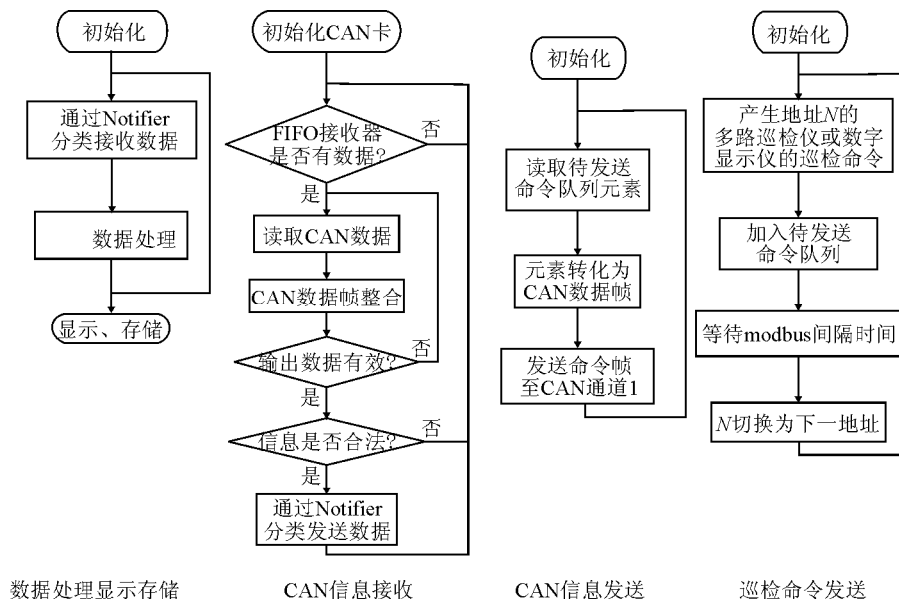


图 3 CAN 通讯流程图

Fig. 3 Flow chart of CAN communication

**2.2.4 人机界面模块** 人机界面实现物理参数、堆状态、电压电流压力等信息显示，并通过 3D 建模演示堆体传动动作。堆状态监测站主界面显示在线巡检、温度、功率保护通道电压功率、快保护通道电压功率、计数率保护仪频率、功调功率、累计中子注量等信息。操纵员站主界面显示报警光字牌、脉冲联锁条件光字牌、传动状态位置、中子源压力、主电磁铁电流电压等信息。物理员站、副物理员站主界

面在增殖测量界面和周期测量界面之间切换。值长站、大屏幕控制站界面集中监测监测层各工作站信息和堆重要状态参数。

**2.3 软件主要功能设计**

**2.3.1 周期测量功能** 周期测量通道结构示于图 4。根据“点堆”模型假设下的中子动态方程解得堆内中子密度  $n(t)$  满足式 (1)：

$$n(t) = n(0) \sum_{j=0}^6 A_j e^{t/T_j} \quad (j=0, 1, \dots, 6) \quad (1)$$

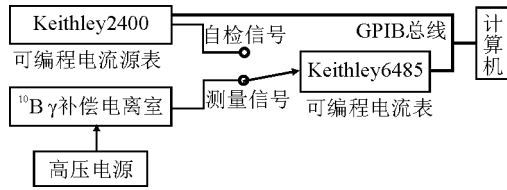


图4 周期测量通道结构

Fig. 4 Structure of period measure instrument

式中:  $n(0)$  为初始时刻无外中子源下中子密度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $n(t)$  为  $t$  时刻中子密度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $A_j$  为确定超缓发临界反应性  $\rho$  下指数项的幅度;  $T_j$  为确定超缓发临界反应性  $\rho$  下指数项的周期, s。

超缓发、瞬发临界下稳定周期  $T_0$  为正值,  $T_j$  ( $j=1, 2, \dots$ ) 可忽略。因电离室电流  $I(t)$  正比于  $n(t)$ , 故式 (1) 可简化为:

$$I(t) = I_0(0) e^{t/T_0} + c \quad (2)$$

通过调用动态链接库实现可编程电流表 Keithley6485 初始化、参数设置、单点采样和多点采样等功能。开始周期测量后, Keithley6485 循环单次采样直至电流超过测量起始值, 然后循环多点电流采样并快速估算周期和反应性, 直至电流超过测量终止值或手动停止周期测量, 之后自动保存历史数据, 并自动或手动选择数据段拟合计算周期  $T_0$ , 并在此基础上通过式 (3) 计算反应性  $\rho$ 。不处于周期测量状态时, 循环单次采样, 实时显示电流、功率和估算最近 10 s 的周期、反应性。

$$\rho = \frac{1}{k_{\text{eff}} \beta_{\text{eff}}} \cdot \frac{1}{T_0} + \sum_q \sum_i \frac{E_D^q}{\sum_q E_D^q} \cdot \frac{a_i^q}{l + \lambda_i^q T_0} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为超缓发临界反应性;  $l$  为瞬发中子寿命, s;  $\beta_{\text{eff}}$  为缓发中子有效份额;  $\lambda_i^q$  为第  $q$  种核数第  $i$  组缓发中子的衰减常数,  $\text{s}^{-1}$ ;  $E_D^q$  为第  $q$  种裂变核素的有效缓发中子产额;  $a_i^q$  为第  $q$  种裂变核数第  $i$  组缓发中子相对丰度;  $T_0$  为渐近周期, s。

单次周期测量流程(图5)通过状态机实现。

对周期测量模块性能进行的实验室和快中子临界装置运行实验的测试结果<sup>[5]</sup>均证明周期测量模块重复性、一致性、精度大大优于传统的窗式周期测量仪。某快中子临界装置反应性重复性实验中的周期一致性测试结果示于图6。

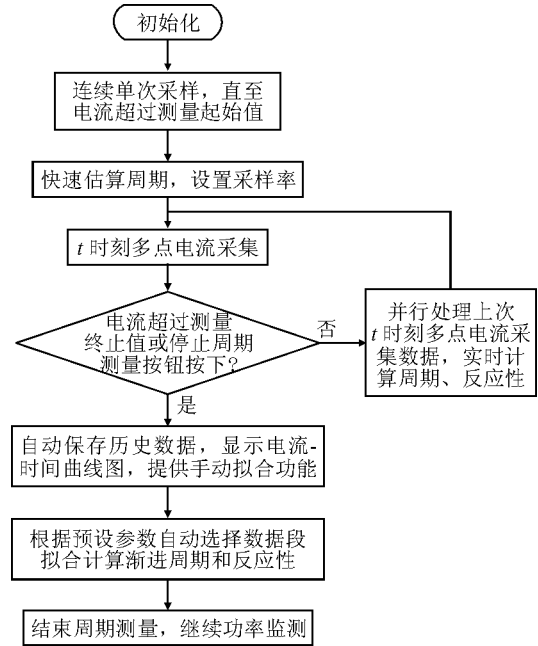


图5 单次周期测量流程

Fig. 5 Flow chart of period measurement

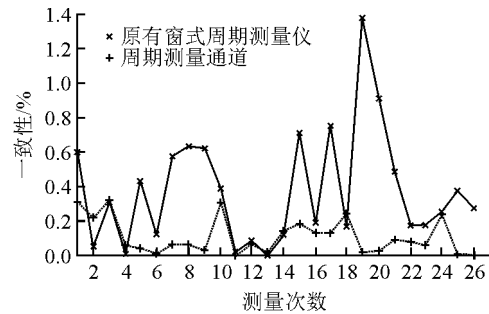


图6 某快中子临界装置周期一致性测试结果

Fig. 6 Coherence of period measurement on fast neutral critical assembly

基于 SCPI 语言实现可编程电流源表 Keithley2400 通讯, 使其工作于对数阶梯式扫描模式, 产生单次或多次指数增长电流信号, 以实现周期测量基本功能的自检。

**2.3.2 增殖反应性测量功能** 增殖反应性测量模块通过通讯读取计数率保护仪的计数率数据, 数据判定采用戈罗贝斯舍弃标准。计数取平均值后按式 (4) 计算增殖  $M$ , 按式 (5) 计算负反应性  $\rho$ :

$$M = M_1 (N - N_0) / (N_1 - N_0) \quad (4)$$

式中:  $N_0$  为无外源情况时, 核装置在初始状态下探测器的本底计数(率);  $N_1$  为有外加中子源

时, 核装置在初始状态下探测器的本底计数(率);  $M_1$  为增殖常数, 物理意义相当于核装置初始状态下的增殖;  $M$  为核装置在某一状态下的中子增殖;  $N$  为核装置在同一状态下探测器测得的计数(率)。

$$\rho = 1/(C(1-M)) \quad (5)$$

式中:  $C$  为与系统特征参数相关的常数。

采用“1/2 原则”或“1/3 原则”预估棒位, 即下一点进棒位置时的增殖不超过当前点的 2 倍或 3 倍。人机界面可显示计数率数据、棒位外推曲线图以及增殖、反应性的实时计算结果。

**2.3.3 报警监测功能** 操作员站通过 CAN 通讯获取报警单元信息并通过虚拟报警光字牌显示, 异常情况时语音报警。并可远程实现报警单元消除报警声和逻辑复位的功能。

**2.3.4 传动位置监测功能** 传动位置监测模块通过 RS-485 网络和 OPC 服务与各传动定点控制单元、功率调节控制仪通讯, 通过虚拟模拟、数字仪表盘显示功调功率及主传动和各调节棒位置。

**2.3.5 在线巡检功能** 在线巡检模块读取和显示传动控制单元的各传动逻辑信息、两路 FPGA 安全保护单元的安全保护逻辑信息、多路巡检仪监测的各路探测器高压值, 并在线判定是否正常。

**2.3.6 电压、电流、压力监测功能** 通过 CAN 通讯获取计数率保护仪频率、安全保护单元的功保通道电压、主电磁铁电压电流、中子源压力并通过模拟、数字虚拟仪表盘显示。

**2.3.7 温度测量功能** 通过 CAN 通讯获取各路热电偶温度数据, 并实现保存、查询、历史曲线显示等相关功能。可选择显示参数设置、单路温度、当前曲线、历史曲线等页面, 可读取温度原始历史数据文件数据并显示历史曲线, 通过游标定位游标对应通道曲线某时刻的温度。

**2.3.8 权限设置功能** 正确输入权限密码后, 远程设置密码权限单元使其输出开堆权限信号。当其工作于开堆权限时, 快中子临界装置可调试其控制保护系统, 可在次缓发临界、低功率稳态工况下运行。当其工作于脉冲工况权限时, 快中子脉冲堆可爆发脉冲。

**2.3.9 堆体传动动画演示功能** 3D 动画演示程序通过 OpenGL 绘图函数命令建立反应堆堆体模型, 可任意切换观察视角, 实时读取各传动部件位置数据、堆状态等信息, 以实现动画实时演示效果。

## 2.4 软件系统出错处理设计

软件产生的错误和异常情况记录入错误日志文件, 以备事后检查分析故障原因。某些特殊错误将给出错误提示对话框。

## 3 结论

该计算机在线测量系统已成功应用于某两套快中子临界装置上, 不带核、带核实验结果证明系统满足设计要求, 大大提高了装置测控自动化水平, 提高了集中监控能力和可操作性, 更符合人因工程需求。主要技术和硬件模块可应用于其他临界、次临界装置上, 具备良好的通用性和可移植性。

## 参考文献:

- [1] 李勳, 鲁艺, 荣茹. 基于 SOPC 的反应堆报警单元设计[J]. 核动力工程, 2008, 29 (5): 86-90.  
LI Meng, LU Yi, RONG Ru. Design of reactor alarm instrument based on SOPC[J]. Nucl Power Eng, 2008, 29(5): 86-90(in Chinese).
- [2] 李勳, 鲁艺, 荣茹. 基于 Nios II 的反应堆嵌入式密码权限单元设计[J]. 核动力工程, 2007, 28 (Z2): 49-52.  
LI Meng, LU Yi, RONG Ru. The design of password authorization system on reactor based on Nios II [J]. Nucl Power Eng, 2007, 28(Z2): 49-52(in Chinese).
- [3] 鲁艺, 李勳, 荣茹. 反应堆用定标保护仪的设计与实现[J]. 核动力工程, 2008, 29 (6): 66-69.  
LU Yi, LI Meng, RONG Ru. Design of scaler protector for reactor[J]. Nucl Power Eng, 2008, 29(6): 66-69(in Chinese).
- [4] 胡倩, 李勳, 胡锦涛. 快中子临界装置状态参数监测单元设计[J]. 核动力工程, 2010, 31 (2): 63-66.  
HU Qian, LI Meng, HU Jinqun. Design of parameter polling instrument for fast neutron criticality facility[J]. Nucl Power Eng, 2010, 31(2): 63-66(in Chinese).
- [5] 李勳, 胡倩, 胡锦涛. 基于虚拟仪器技术的快中子临界装置周期测量单元研制[J]. 核动力工程, 2008, 29 (6): 74-78.  
LI Meng, HU Qian, HU Jinqun. Design of period measurement instrument for fast neutron criticality facility based on virtual instrument technology[J]. Nucl Power Eng, 2008, 29(6): 74-78(in Chinese).