

数字化的核反应堆 物理启动系统的研制和应用

曲荣红,李保祥,徐小琳

(清华大学核能技术设计研究院,北京 102201)

摘要:介绍了数字化物理启动系统的构成和基本工作原理,及其在 10 MW 高温气冷实验堆物理启动试验过程中的首次成功运用。实践证明:该系统不但运行可靠,计算迅速准确,减轻了人员劳动强度,且与同类模拟系统相比,具有实时监测显示、试验结果透明度高的特点。

关键词:核反应堆;物理启动;数字化

中图分类号:TL362.1

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2004)02-0189-04

Study and Application of Digital Physical Start-up System for Nuclear Reactor

QU Rong-hong, LI Bao-xiang, XU Xiao-lin

(Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China)

Abstract: The digital physical start-up system for nuclear reactor is introduced. The system was used successfully in physical start-up experiment of 10 MW high-temperature gas-cooled reactor. It is proved practically that the system not only runs reliably and calculates both rapidly and correctly and relieves the loads of operators, but also has the better characters of monitoring and showing the real-time results of experiments than the analog systems.

Key words: nuclear reactor; physical start-up; digitalisation

反应堆的物理启动试验是反应堆建造完成后的重要试验,关系到反应堆能否安全地达到临界并过渡到正常运行状态。目前,国内外该试验多采用传统的模拟式仪表进行监测,试验过程中需进行大量的人工记录、计算和绘制曲线。在国家“863”计划项目“10 MW 高温气冷实验堆”工程中,为改善实验环境和提高实验质量,本工作研制用于 10 MW 高温气冷实验堆^[1]的数字化物理启动系统。

1 系统的任务和技术性能

系统的任务为:1) 提供中子注量率的监测;2) 自动给出趋近临界的外推结果;3) 向主控室和燃料装卸系统控制室提供与中子注量率成正比的音响信息;4) 在反应堆超临界时,实时显示反应堆功率增长曲线;5) 所有参数均应通过 CRT(阴极射线管 cathod-ray tube) 和 84 寸大屏幕进行实时显示。

收稿日期:2002-11-08;修回日期:2003-02-18

作者简介:曲荣红(1964—),女,山东青岛人,高级工程师,电气及仪表控制专业

技术性能如下:1) 实时监测反应堆内以计数率和定时累积计数表示的中子注量率,计数率为 $0 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$,精度为 2 s^{-1} ,累积时间为 $1 \sim 300 \text{ s}$ 可调,显示刷新时间为 1 s ;2) 具有设定(可在线设定累计时间、阈值和音响分频值)、计算(自动计算脉冲计数率,并根据外推公式自动计算外推临界燃料球数及其外推差值)、显示(实时显示计数率、累积计数、外推数据表、外推曲线、累计时间、燃料球数、阈值和分频值等)、音响(通过音响实时报告计数率水平,并可自动或手动分频)及其分频功能。

2 系统配置

该系统由中子注量率监测部分(A部分)和计算机部分(B部分)组成,且具有3个相同通道(图1)。

2.1 A部分

该部分具有3个相同的通道,每个通道的中子探测器组件由2部分组成:1) ^3He 正比计

数管,灵敏度分别为 1.8 和 $160 \text{ nV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 两种;2) 前置放大器,脉冲幅度约 100 mV ,宽度约 $0.5 \mu\text{s}$,输出阻抗为 50Ω ,最高脉冲计数率为 10^5 s^{-1} 。电缆,长度(分两段)为 $(15 + 35) \text{ m}$ (中间用转接头连接)。

适配器单元由主放、甄别器、成形器、分频选频电路和音响电路等组成。该单元的基本特性:放大倍数为 $25 \sim 100$ 倍可调,输入阻抗为 50Ω ,甄别阈为 $0.5 \sim 5 \text{ V}$,由计算机设定,输出脉冲的最大计数率 10^5 s^{-1} ,幅度为 TTL 电平,宽度为 $0.5 \mu\text{s}$;音响输出信号脉宽 0.1 s ,幅度为 TTL 电平,速率为 $0 \sim 5 \text{ s}^{-1}$;分频倍率为 $1、2、20、200、2\ 000、20\ 000$,共6档。

高压电源供 ^3He 正比计数管用,电压为 $0 \sim 2 \text{ kV}$,连续可调。

低压电源供前置放大器和模拟信号处理组件使用,电压为 $+5$ (一组)、 $+12$ (二组)和 -12 V (二组)。

音响使用 220 V 交流电源,自带功放和音

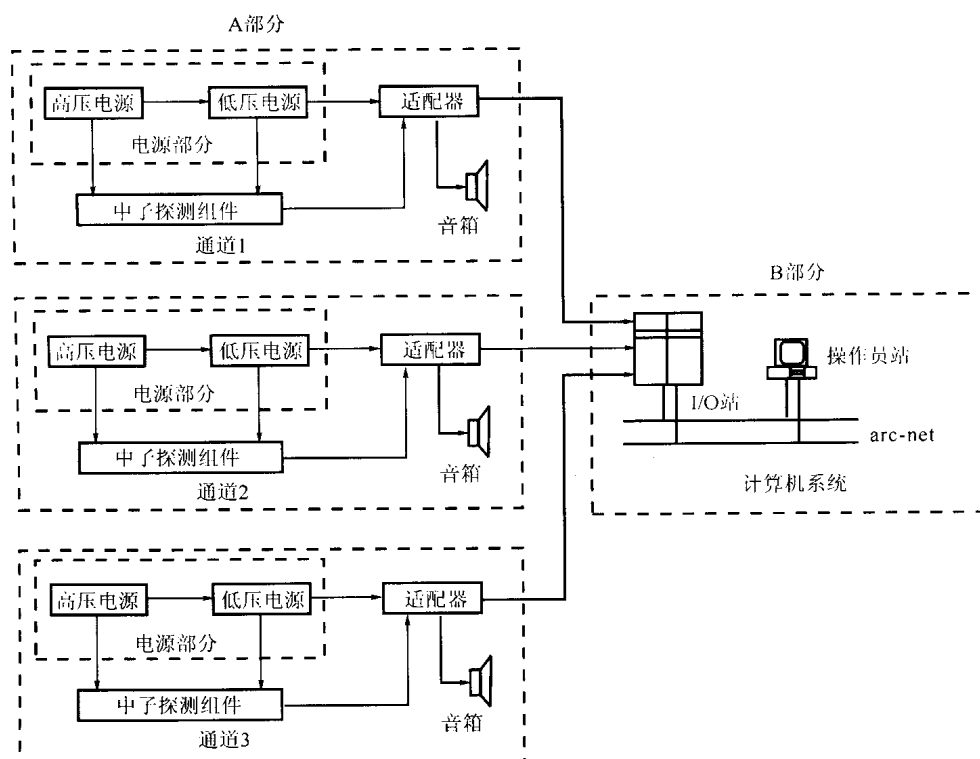


图1 原理框图

Fig. 1 Scheme of work principle

响调节功能。

2.2 B部分

该部分具有3个通道。计算机系统(型号为HS2000,北京和利时公司生产)由1台工控机和现场控制站(I/O站)组成。

工控机基本配置:CPU为奔腾200 MHz;硬盘为2.1 GB。

现场控制站选用HS2000型的功能板:1)改进型HS2F61脉冲量输入输出功能板;2)HS2F60开关量输入输出板;3)HS2F45模拟量输出板;4)HS2F70系统电源模块;5)HS2F72现场电源模块;6)HS2F80CPU板。

3 基本工作原理

数字化物理启动系统在原理上由中子探测器组件、适配器单元及计算机系统组成。

3.1 中子探测器组件

该组件由 ^3He 正比计数管和前置放大器组成。

前置放大器由两部分电路组成:1)信号处理放大和输出电路;2)高压滤波电路。前者对来自探测器的电脉冲信号进行波形处理并放大后输出幅值100 mV信号,通过阻抗为50 Ω 的输出级输出;后者将高压电源提供的电压经过滤波后供给探测器。该前置放大器的特点是:测量范围宽,可达 10^6 s^{-1} ,对脉冲分辨率为0.1 μs ;放大倍数大,输出可达100 mV以上;应用电缆少,只2根(高压1根,低压和信号共用1根);良好的信噪比(优于4:1)。

3.2 适配器单元

本单元由脉冲处理电路(简称脉冲部分)和音响分频电路(简称音响部分)组成。

1) 脉冲处理电路:由主放大器、甄别器、成形器和长线驱动器组成。脉冲部分将来自中子探测组件的脉冲信号进行放大、甄别和成形,滤掉噪声,形成0.5 μs 宽的标准脉冲送到计算机系统和音响部分。经计算机系统处理后得到计数率、累积计数等信号。

2) 音响分频电路:由分频器、分频选择器、音频信号选择器、音频信号发生器、脉宽发生器和混频器组成。由脉冲处理电路来的标准脉冲在分频器上分频,分频倍率为1、2、20、200、2 000和20 000,共6档,对应的音频频率分别

为400、600、800、1 000、1 200和1 400 Hz。为能听到悦耳的脉冲音响并能识别分频倍率,由音频信号选择器根据不同的分频倍率控制音频信号发生器产生不同的音频信号进行输出。

分频倍率由计算机经分频选择器自动(或手动)控制,以保证试验人员清晰听到脉冲速率(一般 5 s^{-1}),将分频的脉冲宽度由脉宽发生器展宽为0.1 s,再用混频器将0.1 s宽的脉冲与相应频率的音频信号混合输出至音箱,通过音响试验人员即可听到悦耳清晰的正比于中子注量率的脉冲音响。

适配器具有以下特点:1)响应时间快,对脉冲的分辨率优于0.5 μs ;2)能够自动分频和可识别分频倍率的音响信号;3)测量范围为 $0 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

3.3 计算机系统

计算机系统接收到I/O站的标准脉冲后,计算出脉冲计数率,根据已知的燃料球数,按照计算公式自动计算临界燃料球数,通过人机界面显示外推结果和外推曲线;根据计数率大小可将自动分频信号送到模拟信号处理单元,以此控制模拟信号处理单元音响电路的分频倍数。

4 软件

通过软件编程,完成系统的控制功能、计算功能、显示功能和打印功能。

1) 控制功能:可实时在线设定累计时间、燃料球数、阈值和音响分频值。操作人员可在人机界面上直接设定或修改这些参数的内容。

2) 计算功能:主要依据外推公式 $M_b = M_2 + (M_2 - M_1) N_1 / (N_2 - N_1)$ 进行计算,其中, M_b 为外推燃料球数; N_1 为上次计数; N_2 为本次计数; M_1 为上次燃料球总数; M_2 为本次燃料球总数。

3) 显示功能:在本系统的显示画面上实时显示计数率、累积计数、累计时间、燃料球数、阈值、分频值、外推数据表和外推曲线等。数字化物理启动系统共有屏幕显示画面5幅,其中,控制画面3幅,外推曲线和实时趋势显示画面各1幅。

4) 打印功能:可在线或离线打印外推数据表、外推曲线和反应堆超临界时实时趋势曲线。

5 系统应用

在 10 MW 高温气冷实验堆首次装料和物理启动试验中,该系统的 3 个中子探测器安置在压力壳的实验孔道内,探测器升降装置布置在堆顶,其他硬件设备均布置在堆主控室内。

10 MW 高温堆是球床式反应堆,用加燃料球方法外推临界,整个过程中堆内中子注量率分布变化范围较大,且中子源对中子探测器计数率的影响变化也较大,在堆芯轴向上的这些变化尤为明显。根据高温堆结构的具体情况,3 个试验孔道中分别放置了启动用中子源和 3 个³He 中子探测器(图 2)。中子源采用强度为 $4.4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 的 Am-Be 中子源,置于距堆芯底部 20 cm 的试验孔道内。1# 探测器单独放置于 1 个试验孔道中,距堆芯底部 20 cm,其灵敏度为 $1.8 \text{ nV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;2#、3# 探测器位于同一试验孔道中,前者在后者的下方,两者间距离为 10 cm,用一钢丝绳连接。2# 管的中子灵敏度为 $1.8 \text{ nV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,与 1# 管的相同;3# 管的灵敏度为 $160 \text{ nV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如此放置探测器使 3 个通道的计数率较为平均,便于观察堆内中子注量率的涨落和在相同坐标下绘制物理外推曲线。

装料前,3 个中子探测器测得的中子源强计数率分别为 105、55 和 182 s^{-1} 。选择装了 6 130 个燃料球时为第 1 个外推点,这时,3 个探测器的计数率分别为 682.2、839.2 和 $2 293.1 \text{ s}^{-1}$ 。根据装料数和测得的中子计数率进行物理外推,临界试验得到高温堆的临界装载量为 16 890 个燃料球。

该系统还应用于反应堆装料监测、控制棒、燃料球、吸收球的反应性当量刻度及堆内中子注量率分布测量等试验中。实际证明:该系统数据可靠,性能稳定,抗干扰性强,人机界面良好,操作简便,实验透明度高,满足了反应堆的试验要求。该系统已成功应用于 HTR-10 的首次临界物理启动试验中。

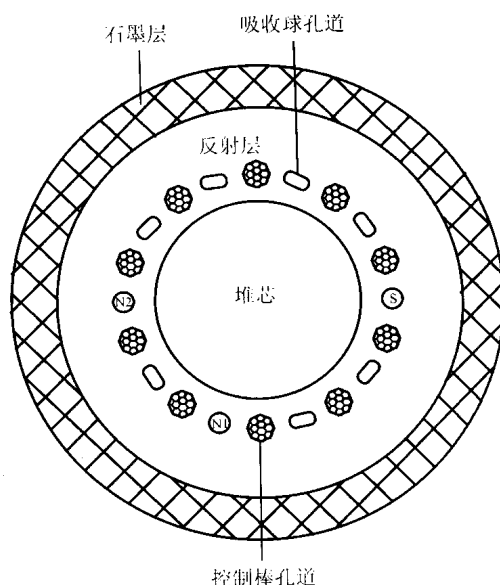


图 2 中子源和计数器布置图

Fig. 2 Layout of counters and neutron source
S——中子源;N1——1# 计数器;N2——2#、3# 计数器

参考文献:

- [1] 徐小琳,曲荣红,边 晖. 10 MW 高温气冷实验堆首次装料和趋近临界[J]. 高技术通讯,2001, 11(123):104~106.