

核反应堆功率控制系统的数字化实现

欧怀谷, 李 富, 张良驹, 冯俊婷

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 功率控制系统是反应堆的一关键控制系统, 系统复杂, 可靠性要求高。以前的核电站功率控制系统通常采用模拟技术。数字化方案将更有优势, 但有相当的难度和待解决的问题。本文介绍一座试验堆的全数字化功率控制系统的设计方案和思想, 采用了商品级计算机硬件、冗余连锁的软件、严格的质保措施、最终的半实物仿真实验, 论证了数字化是可行的、可信的、安全的、经济的。

关键词: 功率控制系统; 数字化; 控制棒; 控制器

中图分类号: TL362

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)S0-0001-05

A Digitalized Power Control System for Nuclear Reactor

OU Huai-gu, LI Fu, ZHANG Liang-ju, FENG Jun-ting

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As one of key control systems in the nuclear reactor, the nuclear reactor power control system is complicated, and requires very high level of reliability. Usually the power control systems in old reactors are implemented by analogy technology, but the digitalized one will be more powerful and advantageous, and of course be difficult. The paper presents one solution for the digitalized power control system of an experimental reactor, and its methodologies, including the adoption of commercial computer hardware, redundant and interlocked software, strict quality assurance, final verification via partial practicality simulation experiments, with the intention to prove the digitalized power control system is practical, credible, reliable, and economical.

Key words: power control system; digitalization; control rods; controller

1 反应堆功率控制系统的要求

核反应堆功率控制系统是反应堆的一个关键控制系统。它采用手动操作或自动调节方式, 通过改变控制棒的位置或堆芯冷却剂中的硼浓度来改变或维持反应堆功率。此外, 功率调节系统需与核测系统、反应堆保护系统、棒位测量与指示系统, 以及其它控制、调节系统相互

作用、连锁, 是一逻辑较复杂、规模较庞大的系统。

现在国内运行的核电站和大部分试验堆上的功率控制系统大都采用模拟式技术。随着反应堆的仪表控制系统朝着全数字化的方向发展, 其中的功率控制系统不可避免地需要数字化。而且, 控制系统呈现出日益扩大、复杂的趋

收稿日期: 2004-04-15; 修回日期: 2004-05-20

作者简介: 欧怀谷(1980—), 男, 湖南宜章人, 硕士研究生, 反应堆仪表控制专业

势,模拟技术对此越来越显得力不从心。

由于核设施严格的法规限制及高度的可靠性要求,使计算机控制的应用滞后于常规工业部门。但随着计算机技术的进一步发展和完善,反应堆控制系统数字化已成为必然趋势。以计算机为基础的数字控制系统具有如下优越性:

- 1) 计算机的强大处理能力能够实现更复杂的控制逻辑,且执行得更快,出错几率更小;
- 2) 计算机能够很好地处理非线性因素,在不同工况下均能提供最佳控制;
- 3) 计算机强大的、快速的计算能力可保证系统的响应速度、控制效果、控制的智能性;
- 4) 计算机的可编程特性使得系统具有良好的可维护性、可扩展性;
- 5) 计算机的硬件标准化和软件的灵活性使得系统升级、维护、扩展更加方便,模拟设备的备件供应难题也可得到很好的解决。

在我国已建成的试验或生产堆中,已有部分采用了计算机控制,例如,清华大学核能与新能源研究院的 10 MW 高温气冷试验堆,已采用了计算机化的分布式控制系统来实现棒控系统逻辑,但该堆尚未实现全数字自动闭环控制。

目前在建的某实验堆上的仪表控制系统采用全数字化方案。功率控制系统作为仪表控制系统中关键的子系统也采用全数字化方案,它通过操作控制棒(包括调节棒、补偿棒和安全棒)这唯一的反应性控制手段来实现反应堆功率的控制。在功能上,控制系统不仅应有完备的手动控制功能,还应实现核功率的自动闭环调节,以及它们两者在不同工况下的互相切换。所有的手动控制逻辑和自动控制算法将采用标准的数字化控制器来实现,并与反应堆的数字化仪表控制系统无缝地集成为一体。这将是国内首次实现功率控制系统的完整数字化。

2 功率控制系统的数字化方案

2.1 功率控制系统的结构设计

在此实验堆上,控制反应性进而控制核功率的唯一手段是控制棒在堆芯的位置。此实验堆的控制棒采用步进电机进行驱动。因此,对核功率的控制转变为对步进电机转动的控制。

功率控制系统执行控制棒正常提升、插入

有关的控制任务,完成反应堆启动、功率运行、功率转换和正常停堆等功能。启动、功率转换和正常停堆过程中的控制棒操作由手动完成。对功率运行过程中的功率维持,设有手动和自动调节两种控制方式。

系统的核心控制部件是棒控逻辑装置和功率调节装置。它们均采用工控领域标准的数字化控制器,通过棒控输出接口电路将控制信号作用在步进电机驱动器上。

反应堆功率控制系统结构示于图 1。

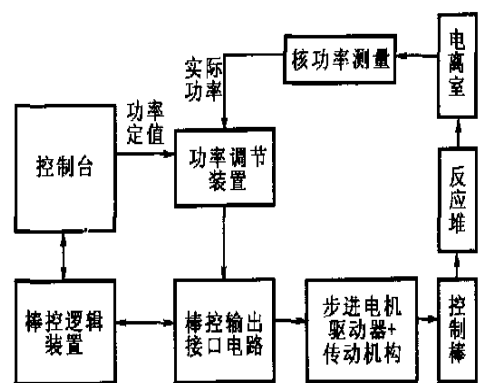


图 1 反应堆功率控制系统结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of reactor power control system

2.2 功率控制系统的逻辑设计

功率控制系统分成两个主要部分:棒控逻辑部分和功率自动调节部分。

棒控逻辑需实现控制棒操作的安全联锁、手动控制、功率自动调节回路的状态监测与选择切换、手动/自动切换控制、控制棒操作监测、以及当反插条件成立时执行控制棒反插功能、棒位计算、棒位数字显示等功能。棒控逻辑流程图示于图 2。

功率自动调节部分将执行功率调节算法,自动维持反应堆功率在预定的水平,还将根据控制台功率定值按钮的操作执行功率定值修改功能,根据来自核功率测量装置的信号计算核功率、启动量程周期值。

2.3 功率控制系统的半实物仿真试验

为保证功率控制系统逻辑的正确性,特别

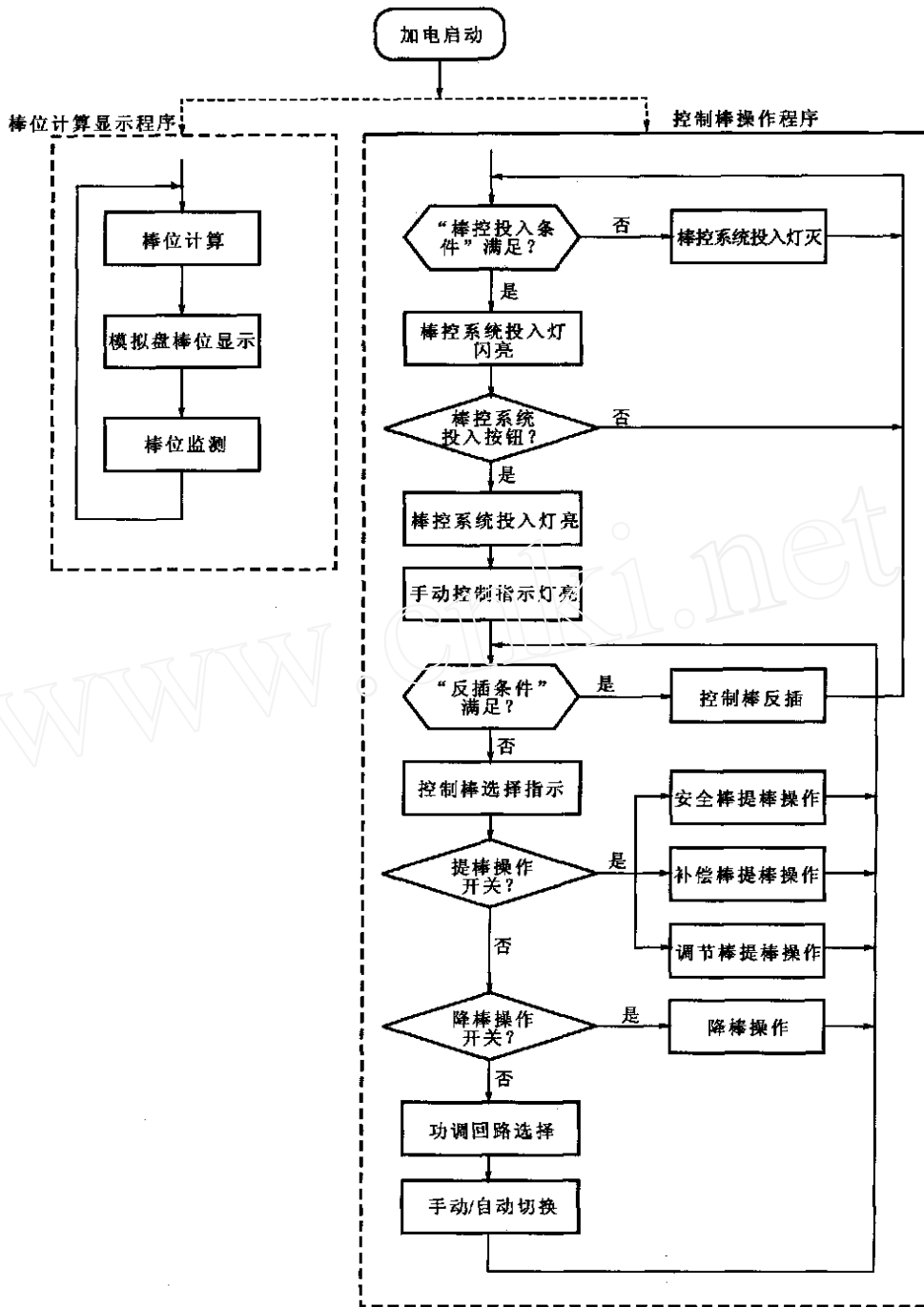


图 2 棒控逻辑流程图

Fig. 2 Flow chart of control rods control logic

是功率自动调节系统的控制性能指标能达到设计要求,功率控制系统必须先经过半实物仿真试验进行最终验证。

半实物仿真试验通过采用真实的控制棒驱动机构、真实的棒控逻辑单元、真实的功率自动

调节单元与用计算机仿真的反应堆动态模型实时交互,以检验并验证接口电路、棒控逻辑、功率调节算法的可用性与正确性,并在试验中优选出调节算法的参数。

半实物仿真试验系统结构图示于图 3。

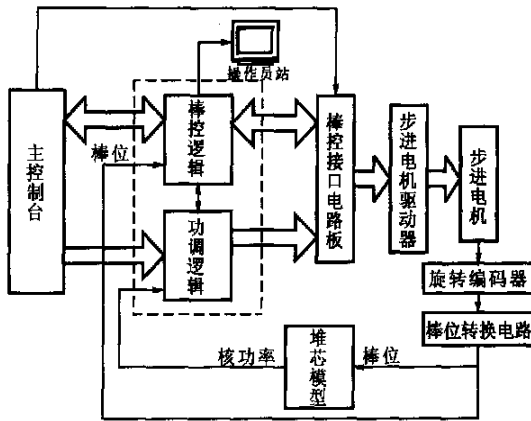


图3 半实物仿真试验系统结构

Fig.3 Schematic structure
of partial practicality simulation system

3 功率控制系统的设计思想

反应堆功率控制系统是与反应堆安全直接有关的重要系统之一,因此,设计全数字化的控制方案时,必须采用多种措施,以保证系统安全可靠。

3.1 工业化标准控制器与非标准插件结合使用

在核工业中采用商品级计算机硬件而不是单件或小批量制造的专用硬件是一重要趋势。通过采用经过使用广泛的、产自信誉厂商的、在功能和性能上有卓越口碑的、符合实际要求的产品,将能有效保证产品的质量、性能、备件供应和经济性。因此,功率控制系统也和反应堆整个仪表控制系统一样,选用了商品级的、工业标准化的计算机集散控制系统来实现所有的控制逻辑。

但计算机实现的数字逻辑与步进马达驱动器之间不能直接相连,市场上又无现成的接口电路,必须专门设计棒控接口电路板这一非标准插件。如图1所示,该插件连接系统的逻辑部件和执行部件,所有数字、模拟信号都流经它。因此,保证它的质量和性能相当重要。为此,必须制定严格的规格说明书和设计准则,在设计、实现和验收上层层把关。

为提高系统的抗干扰性,接口电路板的输入输出均使用高速光藕隔离,接口电路板的供电也经过了DC-DC隔离。这样,接口电路板的上位接口和下位接口的各种干扰因素可以得到有效屏蔽。所有控制信号均采用电流驱动方

式,这样既有效保证抗干扰性能,又能有效抵消长距离输出带来的信号损耗。

尽可能选用商品级硬件,针对特殊要求又研制专门的接口电路,这样,既满足了功能要求,又在可靠性、安全性、时间进度、备件供应、可扩展性等方面得到优化。同时,在商品级计算机硬件上,还需专门针对核领域的高可靠性要求,在软件设计上进行专门的考虑。

3.2 系统的可靠性设计

系统的可靠性一方面建立在硬件基础之上,另一方面又通过设计来保证。为此,系统采用了冗余设计、联锁控制等方法;在软件设计时周密考虑,并建立了严格的审核制度,包括详细的设计文档、多人独立审查、严格的验证测试等。

冗余设计是保证系统可靠性的重要手段。例如,在大亚湾核电站,反应堆控制系统采用的是Bailey9020系列单元组合式控制仪表,在系统设计上考虑了冗余通道,但Bailey9020系列单元组合式仪表本身并无冗余通道和专用接口,给以后的运行、维护带来了隐患。事实上,自1994年大亚湾核电站商业运行以来,反应堆控制系统已出现一些板件信号漂移、接触不良等故障现象,甚至出现由于板件定值漂移导致停机、停堆的严重事件^[1]。

在本设计中,使用两台工业标准控制器同时运行功率调节软件,互相冗余,当一台发生故障时,系统能够保证自动切换到另外一台工作。此外,所选控制器本身带有冗余设计,两个CPU互相热冗余,当其一失效时,能够自动切换到另一个CPU执行。

反应堆运行的联锁控制不但在软件内部,同时在硬连线上实现必要的联锁。例如,当操作员在控制台进行棒操作时,需要先进行棒选择,然后给出提棒/降棒控制,而且,只允许操作1根棒。在控制台上,通过琴键联锁开关保证只有1根棒被选择,由琴键开关发出的棒选择信号一路送往棒控逻辑装置,一路送往接口电路板。棒控逻辑通过判断再给出一路控制信号,此路信号在接口电路板上和棒选择信号再进行逻辑与,最终确定哪根棒被选定。

为了保证系统的可靠性,控制器的所有开关量输出均采用触点输出方式。

在正常停堆或遇到紧急事故停堆时,控制器将发出联锁信号,并送往接口电路板。当此信号存在时,接口电路板的联锁电路保证只输出降棒信号给步进电机驱动器,迫使各控制棒降落(若保护系统已经使控制棒落下,则实际降落电磁线圈)。

棒控逻辑和功率自动调节算法功能复杂,组织较庞大,在设计时,采用了模块设计法,即先进行大流程设计,再细分模块设计。这样,既降低了出错几率,又使得程序模块清晰,易于修改、维护。充分利用控制器的多任务操作系统特性,使互相独立的任务由计算机调度,提高了系统的实时性,降低了各模块之间的耦合度。在软件实现上,使用组态软件,采用形式化方法描述系统逻辑,提高了工作效率,降低了编程人员的人为出错几率。

3.3 多系统连接

反应堆功率控制系统是整个数字化仪表控制系统的有机组成部分,它连接了保护系统、测量系统、人机界面系统等。与系统安全运行直接相关的信号,例如,保护系统投入标志信号,通过硬连线经由 I/O 通道直接送入控制器。

功率控制系统不断地通过以太网向人机界面系统发送反应堆运行期间的各项参数,这样,充分利用了网络传输的快速性,减轻了系统 I/O 通道的负荷。

4 结束语

反应堆控制系统的数字化历经了前人多年的研究。本文通过介绍某实验反应堆的全数字化核反应堆功率控制系统的设计方案和设计思想,提出可以尽可能地采用水平级计算机硬件,在软件设计上考虑冗余、联锁、形式化编程方式,再配合专门的接口电路,严格的审查、验证等质保手段和最终的半实物仿真实验进行尽可能真实的验证,使设计的功率控制系统尽可能的安全、可靠、稳定、高效。目前,设计工作已完成,正在进行半实物仿真验证实验和工程实施。这些设计经验为今后反应堆功率控制系统的设计、技术改造可提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 董孝胜,黄维哲. 反应堆控制系统在线试验台在预防性维修中的应用[J],核科学与工程,2001,21(增刊):63.