

可组装模块在高温气冷堆 全范围仿真机中的应用

李思凤, 李 富, 马远乐, 石 磊

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 鉴于目前反应堆全范围仿真机的开发周期长、升级困难、适用范围窄这一状况, 借鉴 Linux 操作系统内核所采用的可安装模块, 研究提出可动态组装模块方案, 并将其应用到仿真机系统的设计上, 成功地开发出构成模块可组装的高温气冷堆全范围仿真机系统。仿真结果表明: 采用可组装模块方案设计高温气冷堆全范围仿真机系统是完全可行的。

关键词: 可组装模块; 高温气冷堆; 全范围仿真机; Linux 内核

中图分类号: TL334

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)01-0083-06

Application of Assembly Module to High-Temperature Gas-Cooled Reactor Full-Scope Simulation System

LI Si-feng, LI Fu, MA Yuan-le, SHI Lei

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

Abstract: According to the circumstances that exist in the reactor full-scope simulators development as long development cycle, very difficult upgrade and narrow range of applicability, a kind of new model was developed based on assembly module which root in Linux kernel and successfully applied to the design of high-temperature gas-cooled reactor full-scope simulator system. The simulation results are coincident with the experimental ones, and it indicates that the new model based on assembly module is feasible to design of high-temperature gas-cooled reactor simulation system.

Key words: assembly module; high-temperature gas-cooled reactor; full-scope reactor simulator; Linux kernel

我国的核安全法规要求: 只有具备特定资格的运行人员, 才能控制和指挥核电厂的运行和状态的改变; 核电厂必须挑选适当的合格人员并给予必要的培训和指导, 使他们能在各种运行状态和事故工况下按照运行规程正确地履

行职责。要保证做到这些, 就必须配备模拟机, 按培训大纲的规定, 对运行人员进行培训和考核。

高温气冷堆必须配备专用的全范围仿真机。高温气冷堆仿真系统的研究正处于不断完

善和发展过程中^[1-4],但目前研制出来的仿真机皆属于紧凑型仿真机范畴,不适合对电厂运行人员进行集中培训和考核。

全范围仿真机的设计是一个复杂庞大的工程。一次性设计出整个系统,同时又要求它的功能强大、完善,这往往难以实现。针对这一状况,基于 Linux 内核的设计方案,本工作研究提出一种可组装模块设计方案,并将其应用于高温气冷堆全范围仿真机设计中。

1 可动态组装模块的实现原理

可组装模块(module)是经过编译但尚未连接的目标代码(.o)文件,可在系统启动之前动态地连接到系统中^[5]。当以不同模块实现 1 个系统结构中的不同层次时,在上层模块的源代码中规定允许“移出”(export)自身的一些符号,如函数名、全局变量等,使下层模块可调用这些函数或访问这些全局变量。对这些符号的引用是在模块连接时解决的。

每个模块(最底层的模块除外)均需向位于其下层的模块移出若干符号;同时,需向其上层模块“登记”一些标准函数,供上层模块调用。上层模块只有在下层模块向其登记之后才会调用下层模块中的函数,从而间接访问下层模块中的变量,对下层模块没有依赖关系。但反过来,下层模块对于上层模块则有依赖关系(引用上层模块中的符号)。

这样,将会形成 1 个模块堆栈(图 1)。位于堆栈(层次意义上的)顶部的模块其实就是核心软件本身,它虽非一可动态组装模块,但在实现上可以使用可组装模块的方案,只需做些特殊处理而已。

综上所述,每 1 个模块实际上皆存在于 1 个模块堆栈中。每 1 个模块均不能脱离它的环境而存在和运行。这个环境即是由位于其上层的模块提供的。至少,它的直接上层应提供 1 个函数,使它可向上层登记,所以,至少要向它移出 1 个符号(包括函数和变量)。但并非每个模块皆须依赖于其上层的模块(图 1),但通常对核心软件部分有依赖关系。

一般情况下,1 个模块与系统中其它模块之间的关系如图 2 所示。

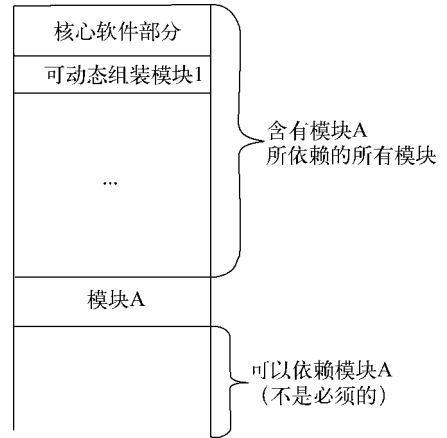


Fig. 1 Module stack

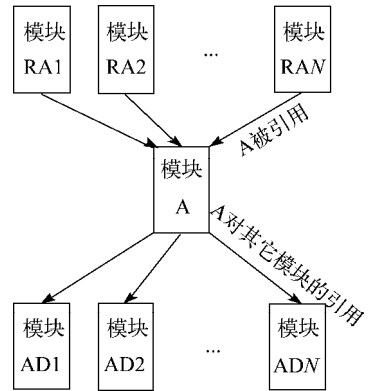


Fig. 2 Relationship of dependency and reference of module A with other modules in system

2 可组装模块方案在高温气冷堆全范围仿真机设计中的具体应用

2.1 Linux 内核的可安装模块

Linux 提供了一种全新的机制,称作(可安装)模块(module)。利用这个机制,可根据需要,在不必对内核重新编译连接条件下,将可安装模块动态插入运行中的内核,成为内核的一有机组成部分,或从内核移走已安装的模块。正是这种机制,使得内核的内存映象保持很小,但却具有很大的灵活性和可扩充性。

对于高温气冷堆全范围仿真机的设计,整个系统除了核心部分开始时必须提供之外,其它模块可在以后添加(图 3、4)。因而,这与 Linux 内核有着某种程度上的相似性,完全可

借鉴 Linux 内核所采用的可安装模块的思路。

但 Linux 内核是运行在系统级状态下,而高温气冷堆系统则运行在用户级,在实现上难度较大;此外,对于反应堆全范围仿真机,动态安装、拆卸模块这一功能不是必须的,通常在系统启动后,构成模块很少变化。针对系统这一特点,采用折衷的办法,即将 Linux 内核中可安装模块的实现方案应用到高温气冷堆全范围仿真机系统可组装模块设计方案中,既充分利用其灵活性、扩展性等优势,又避免了因要求组成模块可动态安装、拆卸所引入的困难。可组装模块与可安装模块间的主要区别是可组装模块不要求在运行过程中安装、拆卸,只需在运行之前

前组装 1 次即可。

2.2 必要性及可行性

典型的全范围仿真机系统一般包括仿真计算服务器、主控室和教练员站 3 个子系统,它们之间通过输入输出接口或网络相连。目前,高温气冷堆已实现了数字化的主控室,因而,本工作所研究的系统中的 3 个组成子系统,采用网络进行信息交换。

高温气冷堆仿真机系统总体框架示于图 3。

仿真计算服务器是整个仿真机系统的核心,它直接决定着整个系统的性能和可靠性。仿真计算服务器端模块依赖引用关系示于图 4。

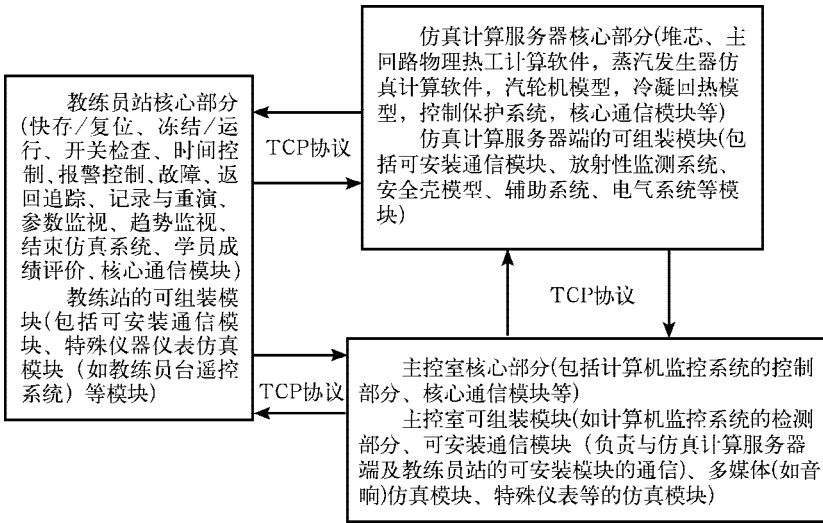


图 3 高温气冷堆全范围仿真机框架

Fig. 3 Architecture of high-temperature gas-cooled reactor full-scope simulator

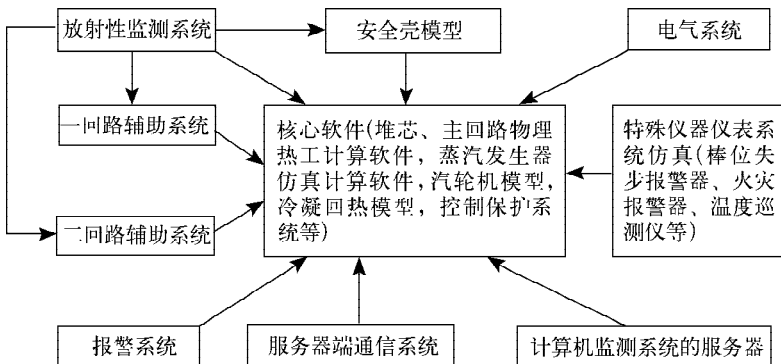


图 4 仿真计算服务器端模块依赖引用关系图

Fig. 4 Relationship of dependency and reference of modules in computation server of simulator

高温气冷堆全范围仿真机的仿真计算服务器应对包括一回路、二回路、控制和保护系统及所有辅助系统等在内的所有子系统进行仿真计算。因而,在子系统内将包括:1)堆芯、主回路物理热工计算软件,蒸汽发生器计算软件,汽轮机仿真,冷凝回热系统仿真,控制保护系统仿真等;2)安全壳仿真,放射性监测系统仿真,电气系统仿真,特殊仪器仪表(棒位失步报警器、火灾报警器、温度巡测仪等)仿真,一回路辅助系统的仿真,二回路辅助系统的仿真,报警系统的仿真,计算机监测系统服务器端的仿真等。

目前,已设计出图4中所示所有计算模块。因受人力、物力资源等各方面因素的限制,要求设计满足功能强大和完善,尚不现实,有必要考虑采用可组装模块技术。可以看出:1)中的模块对2)中模块依赖关系可忽略不计,但2)中的模块依赖1)中的模块,因而,可将1)中的模块作为核心软件优先设计,这一部分必须在仿真机中存在;将2)中的模块作为可组装模块,在有需求或条件允许情况下动态链接到系统中。

2.3 应用

模块划分如图3、4所示。

将下层可组装模块连接到上层模块中较为容易,但仅做到这一点还不能使上层模块注意到它的存在,还必须提供1种办法,使下层可组装模块能向上层模块进行登记。

以下以仿真计算服务器子系统为例描述具体的实现方案。借鉴Linux内核中可安装模块的实现方法,首先从该子系统上的上层模块中移出(export)供下层可组装模块引用的变量、函数。该子系统中提供的用于组装可组装模块的基础设施如下。

1)维持1个全局结构数组,用于登记可组装模块 `simumodule[MAX_SUB]`,以模块号为下标;1个全局位图 `ModuleBitmap`(位图中每1位标识相应的模块是否已经连接到系统中)。这样,上层模块即可根据 `ModuleBitmap` 确定是否需要调用相应模块所提供的函数指针。

2)仿真计算服务器端辅助程序。考虑到高温气冷堆全范围仿真机系统中的仿真计算服务器利用 Fortran 和 C 混合编程设计而成,且该系统与其它软件通信的接口采用 C 语言编写,故该辅助程序用 C 语言开发。该辅助软件

受到3)中所提到的 Shell 应用程序的启动,然后将用户希望组装进仿真计算服务器子系统的模块信息通过网络传递给仿真计算服务器。仿真计算服务器软件把接收到的信息根据模块号登记在1)中所提到的全局结构数组 `simumodule[MAX_SUB]`中,并相应地设置全局位图 `ModuleBitmap`。该辅助软件在完成模块信息传递后即退出运行。

3)1个 Shell 应用程序。该程序负责在启动仿真计算服务器子系统前对其进行配置。它一方面收集用户做出的选择信息,并根据所收集的信息进行模块链接,另一方面负责启动仿真计算服务器软件及2)中所提到的辅助程序。该程序在完成上述任务后即退出运行。

3 高温气冷堆全范围仿真机系统总体介绍

该系统所采用的软件平台是 Linux 和 Windows 系统共存构成的混合结构,其中,仿真计算服务器在 Redhat Linux 7.3 系统下设计;主控室与教练员站两个子系统在 Windows XP 系统环境下开发。

该系统实现了高温气冷堆全范围仿真机系统核心部分的设计(图5),并提供了动态装载可组装模块的基础设施。不失一般性,本文选择了图4中计算机监测系统服务器端和主控室监控系统中的监测部分两个可组装模块对所提供的基础设施进行正确性验证。

3.1 仿真计算服务器

为保证仿真计算的可靠性和正确性,核心软件中重用 THERMIX 和 BLAST 两个软件包。这两个软件包均用 Fortran 77 语言编写,运行在 Unix 工作站上。本工作将其成功地移植到 Redhat Linux 7.3 自带的 Fortran 77 编译器下,利用各种典型的工况对移植后的程序进行了正确性验证,其计算结果与移植前吻合。核心软件其它部分自行开发,使用前均进行了仔细验证。

3.2 主控室与教练员站子系统

仿真主控室操作界面与实际主控室保持一致,用户可用鼠标和快捷键,通过菜单、按钮和工具栏等各种手段方便地与仿真系统进行交互操作,便于用户掌握。仿真计算结果可通过指

示灯、表盘、滑块、开关、数码管、动态二维、三维图形、历史曲线、雷达图等多种图形方式形象地显示出来,且各种图形部件分布合理,提供最佳

的信息量,符合人因工程原则,便于了解堆的运行状态。图6为主控室计算机监控系统中监测部分中的1幅画面。

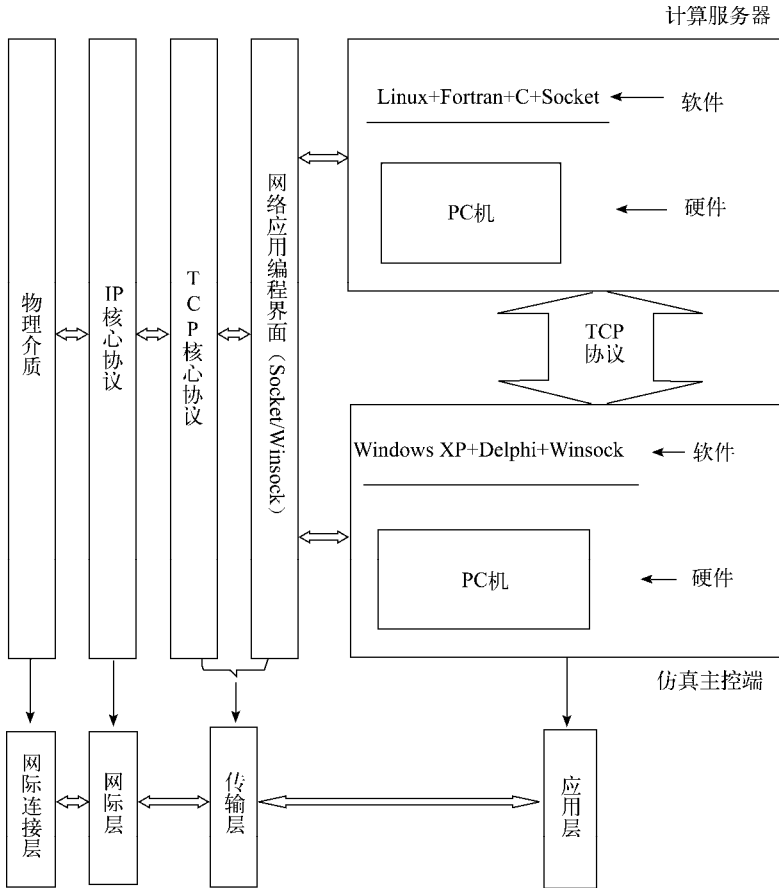


图5 高温气冷堆全范围仿真机核心软件部分逻辑结构

Fig. 5 Logic structure of kernel software of high-temperature gas-cooled reactor full-scope simulator

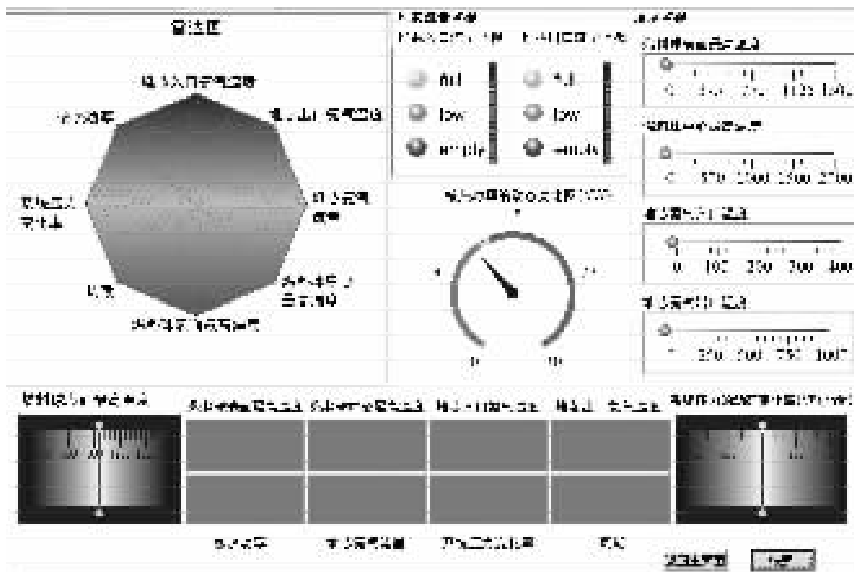


图6 安全参数监视系统

Fig. 6 Safety parameters display system

教练员台实现了核心部分的功能,大的方面包括:快存/复位、冻结/运行、开关检查、时间控制、报警控制、故障、返回追踪、记录与重演、参数监视、趋势监视、结束仿真系统、学员成绩评价、辅助练习等功能。

3.3 通信程序的设计

仿真系统采用 Linux 和 Windows 两种操作系统,需要解决异种平台通讯程序的设计问题。数据通讯的可选方案主要有两种:1) 直接利用两种操作系统分别提供基于 TCP/IP 协议的 Socket 与 Winsock 编程接口实现;2) 采用数据库方式。仿真系统在实时性上要求较高,前者具有速度快的优点,可以实现大量数据的高速通信,因而被优先选用。

Socket 或 Winsock 通信有面向连接和无连接两种方式,分别对应于两种不同的网络协议:TCP(面向连接)协议和 UDP(无连接)协议。前者可靠,对数据有重发和校验机制;后者取消了重发和校验机制,能够达到较高的通信速率,但不能保证数据传输的可靠性。由于高温气冷堆仿真系统对可靠性要求较高,因而选择 TCP 协议。

4 结论

本工作成功地将可组装模块设计方案应用于反应堆全范围仿真机系统的设计上,开发出先进高温气冷堆全范围仿真系统。目前该系统已基本完成研制开发。可组装模块设计方案的核心思想是:先完成核心部分的设计,并提供动态组装模块的基础设施,以保证在有需要或条件允许情况下动态组装所需要的模块,以满足

不同的应用需求。采用这种方案设计的系统具有适用性广、扩展性好等优点,既可满足对电厂运行人员进行集中培训和考核的应用需求,也可进行以瞬态分析、事故分析、设计为目的的工程分析。可组装模块设计方案同样适用于其它核电站、火电站模拟器等的设计。

参考文献:

- [1] PONOMAREV-STEPNOI N N, LEBEDEV V A, KHUDIYKOV M M, et al. The development and creating of new-generation full-scope simulator and new technology of simulation[J]. Nucl Eng Des, 1997, 173:349-354.
- [2] 孙永滨. 田湾核电站全范围仿真机综述[J]. 核动力工程, 2001, 22(6):563-566.
SUN Yongbin. Full scope simulator of Tianwan NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(6): 563-566(in Chinese).
- [3] 石磊,高祖瑛. 基于微机系统的高温气冷堆工程仿真机[J]. 核动力工程, 2001, 22(3):280-288.
SHI Lei, GAO Zuying. A personal computer-based engineering simulator for high-temperature gas-cooled Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(3): 280-288(in Chinese).
- [4] 罗少杰,石磊,朱书堂. 基于网络的 10 MW 高温气冷堆仿真系统[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(1):66-68.
LUO Shaojie, SHI Lei, ZHU Shutang. Network-based simulation system for 10 MW High-Temperature Gas-cooled Test Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(1): 66-68(in Chinese).
- [5] 毛德操,胡希明. Linux 内核源代码情景分析(下册)[M]. 浙江:浙江大学出版社, 2001:134-178.