

CNIC-01308

TSHU-0084

压水堆核动力厂控制系统可视化模化与仿真软件——NCS

崔震华

(清华大学工程物理系, 北京, 100084)

摘 要

对压水堆核动力厂控制系统的建模与仿真进行了较系统的研究。提出了用于压水堆核动力厂控制系统快速和精确仿真的被控对象数学模型和数值方法。被控对象模型主要包括堆芯、稳压器、蒸汽发生器、管道及泵的模型等,分别采用了龙格-库塔法和特雷纳方法求解这些模型。设计了面向控制系统结构图的可视化模化平台,实现了图形方式下的控制系统可视化建模,并采用离散相似法对所建立的控制系统数学模型进行求解。研制出了相应的压水堆核动力厂控制系统可视化模化与系统仿真软件——NCS,并用NCS软件对商用核电站控制系统进行了仿真研究,得到了满意的结果。NCS软件对核电站控制系统设计和分析研究工作具有很好的参考和实用价值。

NCS——A Software for Visual Modeling and Simulation of PWR Nuclear Power Plant Control System

(In Chinese)

CUI Zhenhua

(Engineering Physics Department, Tsinghua University, Beijing, 100084)

ABSTRACT

The modeling and simulation of nuclear power plant control system has been investigated. Some mathematical models for rapid and accurate simulation are derived, including core models, pressurizer model, steam generator model, etc. Several numerical methods such as Runge-Kuta Method and Treanor Method are adopted to solve the above system models. In order to model the control system conveniently, a block diagram-oriented visual modeling platform is designed. And the Discrete Similarity Method is used to calculate the control system models. A corresponding simulating software, NCS, is developed for researching on the control systems of commercial nuclear power plant. And some satisfactory results are obtained. The research works in the paper will be of referential and applying value to design and analysis of nuclear power plant control system.

引言

控制系统中合理控制方案的确定和方案中各种参数的整定是核电厂控制系统设计的重要内容,控制系统设计的好坏直接影响到核动力厂运行的安全性和经济性。完成这一重要内容的有效方法就是对控制系统进行仿真。目前计算机仿真在动力系统及其控制系统设计和分析中的应用越来越广泛,取得了愈来愈明显的经济和社会效益。为此,作者近年来在利用计算机对核动力厂及其控制系统进行数值仿真方面做了大量的、系统的研究工作。

被控对象数学模型的准确程度直接影响仿真结果的精确性,而十分复杂的数学模型必然导致仿真速度的明显下降,为此本文提出了一些精简而实用的被控对象数学模型,分别选用了龙格-库塔法和特雷纳方法等数值方法求解。

近年来,计算机仿真在具有特殊性的核电站控制系统设计和分析中应用越来越广泛,国外开发过一些专门用于核电控制系统设计和分析的仿真程序。但是这些程序对控制系统结构图的处理往往不是十分灵活,工程技术人员在使用这些程序进行控制系统设计和分析时,面对的通常是仿真程序所需的数据文件,不能方便地把研究对象与仿真程序结合起来,非常不利于控制系统的分析与设计。为了弥补这种不足,本文研制了一个类似于 AutoCAD 的面向控制系统结构图的可视化模化平台。利用该平台,工程技术人员可以非常直观、方便地搭积各种控制系统结构图,实现对控制系统的可视化模化。

在此基础上,研制出了相应的压水堆核动力厂控制系统可视化模化与系统仿真软件 NCS。用该软件对 300 MW 商用压水堆核电站的控制系统进行了仿真研究,得到了满意的结果,证明了本文建模工作的正确性、仿真算法的有效性和仿真软件的可靠性。利用 NCS 软件能方便、快速、准确地模化和仿真核电站控制系统。该软件对开展核电站控制系统设计和分析研究工作具有很好的参考和实用价值。

1. 仿真模型

1.1 被控对象数学模型

在压水堆核动力厂控制系统仿真中,主要的被控对象包括堆芯、稳压器、蒸汽发生器、汽轮机和泵等。所以被控对象的建模工作主要围绕这些部件进行。

1.1.1 堆芯燃料元件热传导方程

采用一维导热模型模拟燃料芯块和包壳的瞬态径向热传导机理时,如果忽略轴向导热、考虑温度轴对称,则可将 Fourier 导热方程简化为径向导热方程^[1]。但在瞬态情况下求解这些与空间位置有关的导热方程很不方便。考虑到相对燃料元件的反应时间而言,热瞬变过程足够长这一因素,参考文献 [2] 的做法,用两个多项式 $T_1 = T_0 + b\xi + c\xi^2$ 和 $T_2 = T_2 + d \cdot \eta$ 来近似燃料芯块温度和包壳温度。这两个多项式满足热传导方程所有边界条件,并且也满足其平均值等于多项式平均值这一条件。其中 ξ 与燃料元件的结构尺寸有关, b 、 c 、 d 是结构尺寸和物性的函数。通过引入平均算子,可将燃料组件的温度求解归纳于求解燃料元件的总平均温度 \bar{T} ,求得 \bar{T} 后再利用代数关系式求任意位置的温度及其平均值。由于推导篇幅太长,具体过程请参考文献 [3]。

1.1.2 流体流动的热工水力学方程

堆芯中燃料元件周围的冷却剂、蒸汽发生器中 U 型管内外流体的流动和能量交换将导

致流体状态参数的变化, 这种变化遵循质量、动量和能量三个守恒方程^[1]。

由于描述流体流动的物理模型不同, 三大守恒方程中参数的平均方法也不同。在本文中, 为了准确描述两相流动, 采用 Martinelli-Nelson 分离流模型^[1]。这种模型认为汽、液两相完全分开, 分别占据着流通截面积的一部分, 对于欠热沸腾和饱和沸腾下的泡状流以及饱和沸腾下的团状流均采用 Zuber 和 Findly 提出的漂移流模型描述空泡份额与含汽率之间的函数关系^[4]。环路流量由动量守恒方程求得。

1.1.3 与被控对象有关的其它模型

除上述模型外, 仿真程序的数学模型还包括堆芯中子动力学模型、稳压器模型、主循环泵模型以及与这些模型相关的传热系数、压降系数、物性方程等。

堆芯中子动力学模型由点堆动力学方程和衰变热方程组成。点堆方程包括六组缓发中子, 衰变热方程有 11 个。稳压器模型为三区热力学不平衡模型, 并考虑了发生在稳压器内的所有重要的热工水力学现象。传热系数的计算分别采用了 Dittus-Boelter 单相传热系数公式、Chen 氏两相传热系数公式、Bromley-Pomerante 和 Dougall-Rohsenow 膜态沸腾传热系数公式。临界热流密度用 Biasi 公式和 Zuber 公式计算。

这些模型和方程的具体形式可以参阅文献 [3], [5] 和 [6]。

1.2 控制系统模型

为了灵活地对各类控制系统进行仿真, 控制系统数学模型的建立不同于被控对象的建模, 即控制系统的数学模型是不固定的。模型的建立以控制系统方框图为基础。通过对构成控制系统方框图的各环节的分析, 确定可视化模化的基本思路是: 在图形界面下, 以菜单方式输入基本元素, 再以对话框方式输入或修改与基本元素有关的参数, 然后用信号线将各基本元素连接起来, 形成控制系统结构图, 再利用添加、删除、移动、复制等功能实现对结构图的修改。

依照这一思路, 本文设计了一个运行 Windows 下的核电站控制系统可视化模化平台, 图 1 为模化平台总界面, 图 2 为线性环节、非线性环节、运算环节和输入(出)信息对话框。各环节之间的连接关系由用户利用连线功能来实现。此外平台还具有对结构图进行保存、打印、编辑等一般图形软件所具有的功能。利用该模化平台, 用户无需编写数据文件, 按照“即见既所得”原则, 实现对核电站控制系统的可视化模化, 建立起与控制系统方框图对应的数学模型, 然后选择菜单中的仿真功能项求解, 就可实现面向结构图的仿真。

图 3 为用该模化平台模化的堆芯平均温度控制系统结构图, 此外也对其它控制系统的结构图进行了可视化模化, 如稳压器压力控制系统、稳压器水位控制系统、蒸汽发生器水位控制系统、蒸汽排放控制系统、给水泵泵速控制系统等。这里不再一一列出其图形。该平台可同时模化和仿真 10 个控制系统, 每个控制系统方框图中包含的各类环节分别可达 50 个之多。

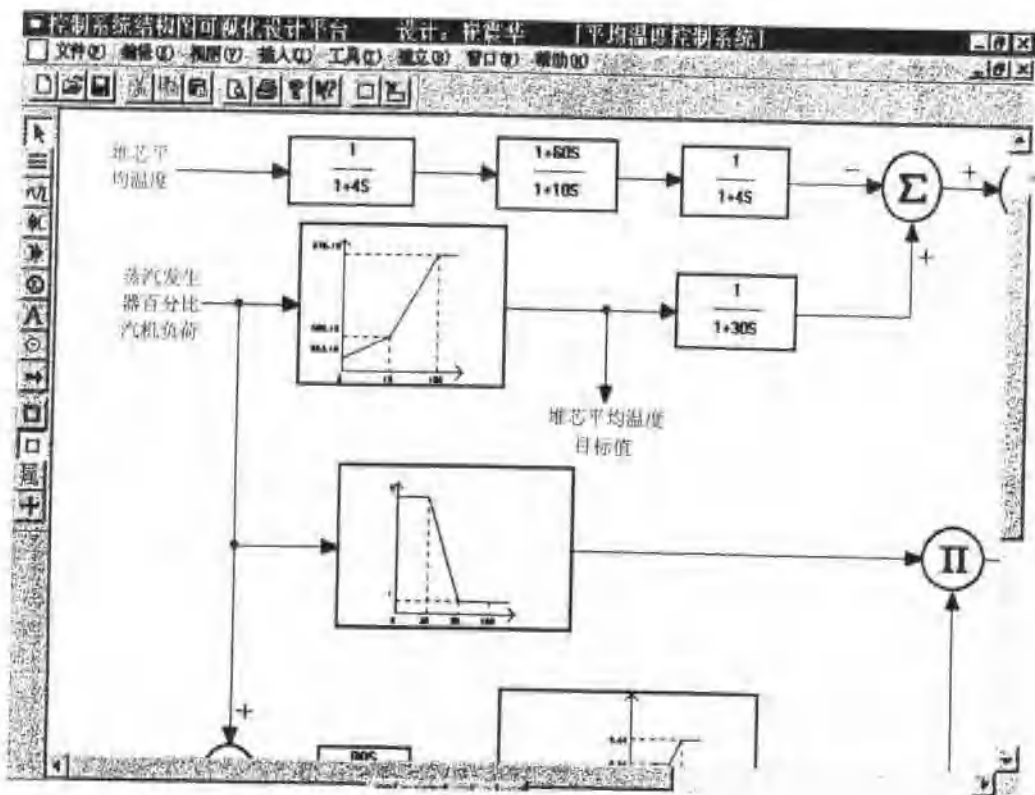
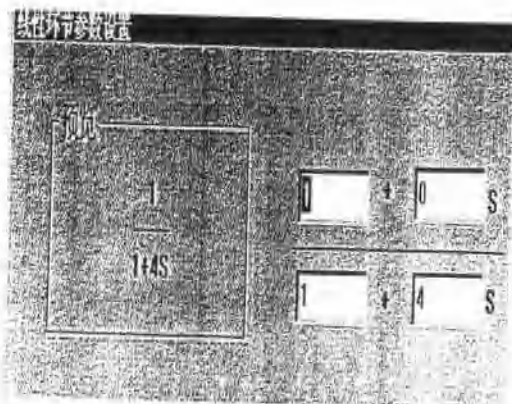
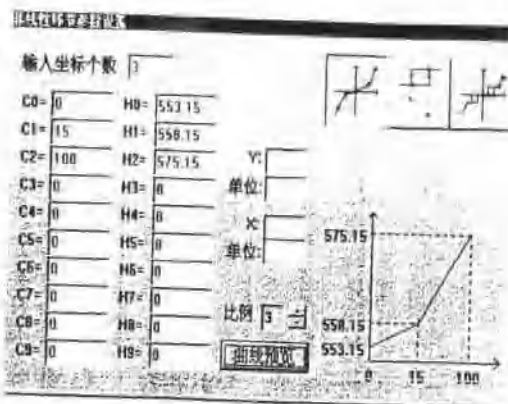


图1 核电站控制系统可视化模化平台界面

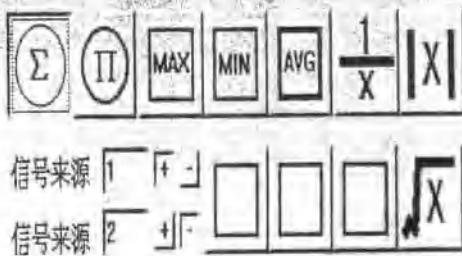


(a) 线性环节对话框



(b) 非线性环节对话框

运算环节设置



(c) 运算环节对话框

输入/出信号



(d) 输入/出信号对话框

图2 线性环节, 非线性环节, 运算环节和输入(出)信号对话框

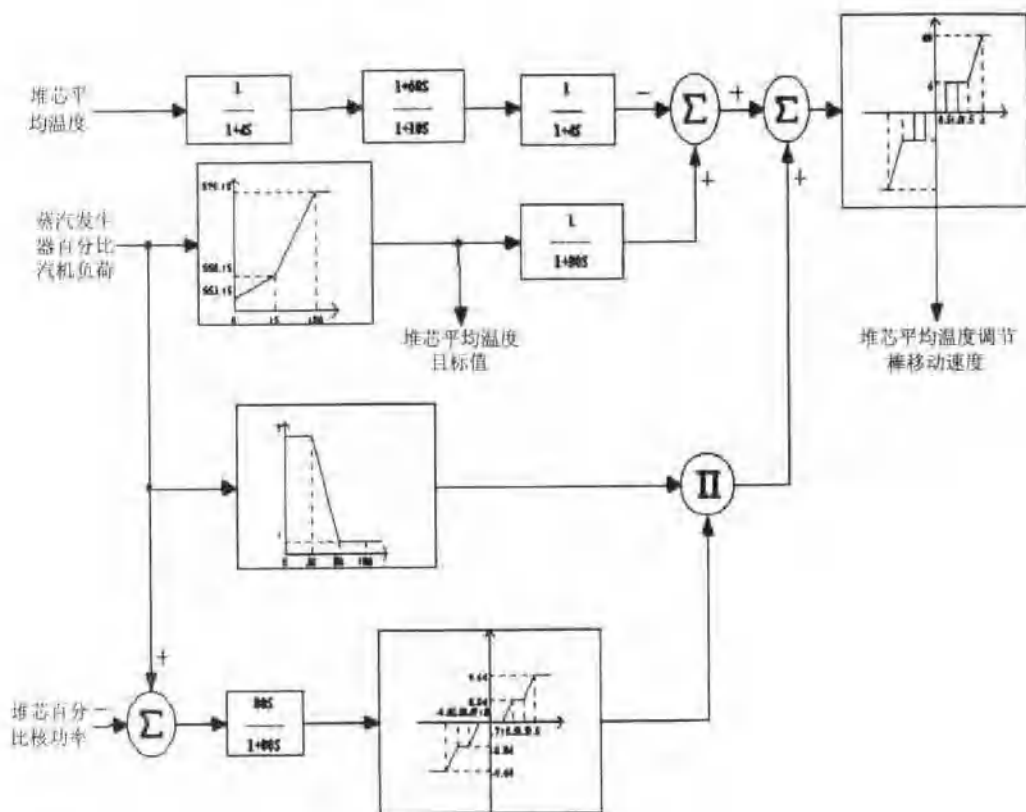


图3 堆芯平均温度控制系统方框图

2 仿真算法

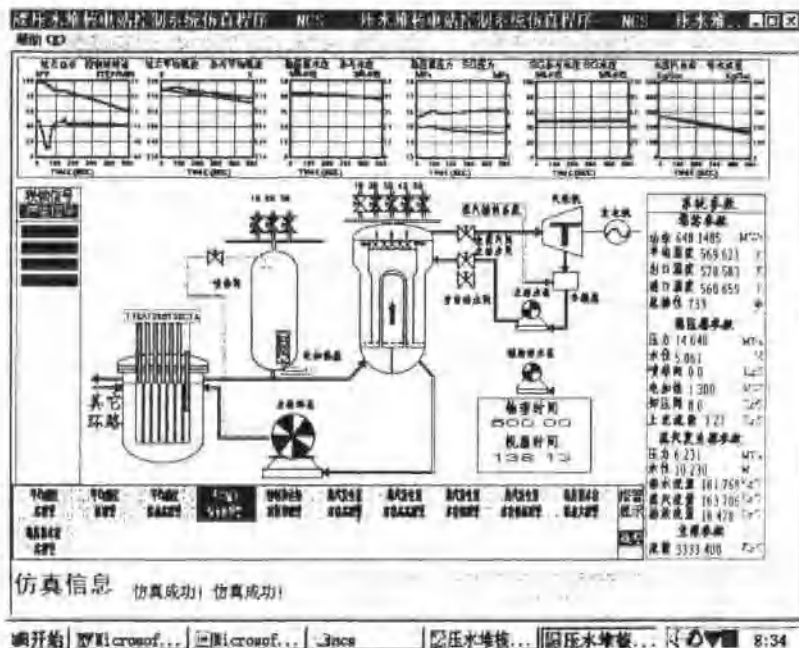
对被控对象堆芯、稳压器、蒸汽发生器、管道及主循环泵的数学模型进行离散化处理，可以得到一系列相应的常微分方程组。这样仿真问题在数学上变成了求解微分方程组初始值问题。目前，求解微分方程初始值问题的数值积分法很多。考虑到不同微分方程组特性的不同，分别采用了龙格-库塔法和特雷纳方法^[7]。龙格-库塔法用来求解非刚性模型，特雷纳方法用来求解刚性模型。在核电站控制系统结构图中一般都包含有许多的非线性环节，给模型的求解带来了一定的困难。资料调研表明，在此情况下，用离散相似法进行仿真比用数值积分法要更有效^[8~10]。

3 仿真软件

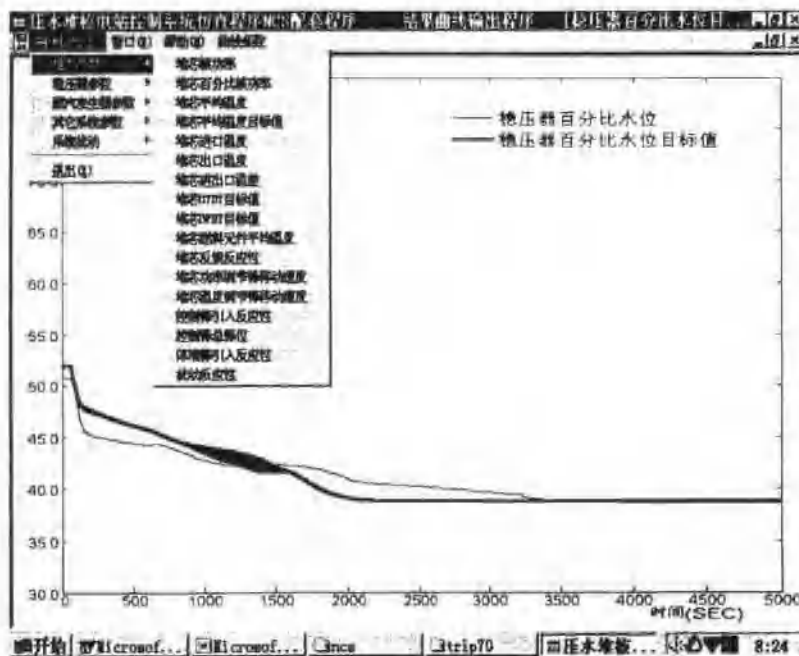
以上述模型为基础，研制了仿真软件NCS。该软件用C++语言编写而成。运行于Windows环境下。该软件包括三个主要的功能模块，即被控对象参数输入和仿真结果输出模块，控制系统可视化模块化模块和系统仿真模块。软件的界面十分友好。图4(a)所示为数据输入界面，图4(b)所示为系统仿真界面，图4(c)所示为结果输出界面。此外，软件还具有比较完善的数据错误和仿真错误提示功能。软件还能单独对某个部件（如稳压器和蒸汽发生器等）及其控制系统进行仿真。



(a) 数据输入界面



(b) 动态仿真界面



(c) 结果输出界面

图 4 NCS 软件主要功能界面

4 软件应用及结论

用软件NCS仿真了一个300 MW压水堆核电站控制系统在甩负荷到厂用电、10%阶跃负荷变化和5%线性负荷变化工况下的控制过程,分析了控制系统的动态调节特性。在做该仿真时,重点考虑了堆芯平均温度控制系统、稳压器压力控制系统、稳压器水位控制系统、蒸汽发生器水位控制系统、蒸汽排放控制系统等。下面给出部分仿真结果,图中SG表示蒸汽发生器。

图5至图9所示为核电站从满功率突然甩负荷到厂用电时,在控制系统作用下,核电站内一些主要参数的变化情况。10%阶跃负荷变化工况设定为从满功率开始阶跃降负荷10%,稳定240 s后,再阶跃降负荷10%,以此类推,一直降到20%额定负荷,稳定340 s

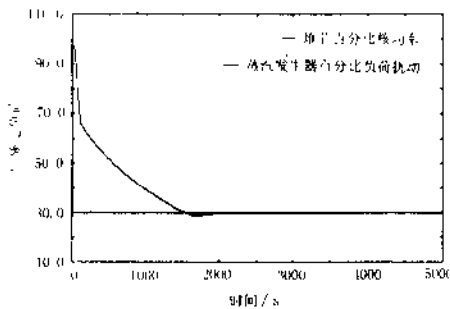


图5 甩负荷时稳压器和SG压力变化曲线

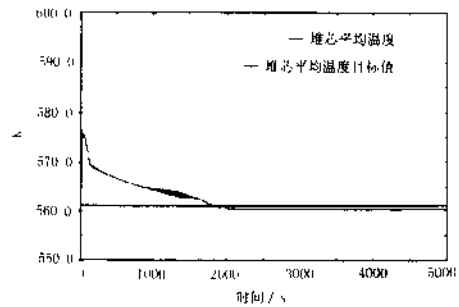


图6 甩负荷时堆芯平均温度变化曲线

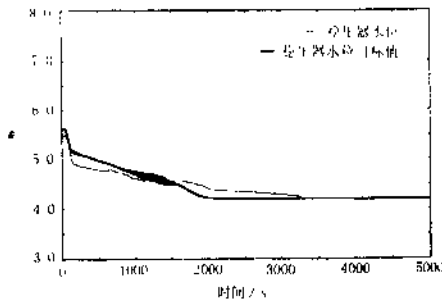


图7 甩负荷时稳压器水位变化曲线

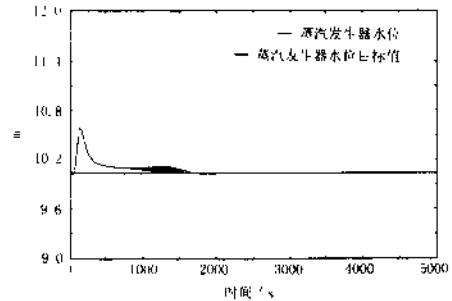


图8 甩负荷时SG水位变化曲线

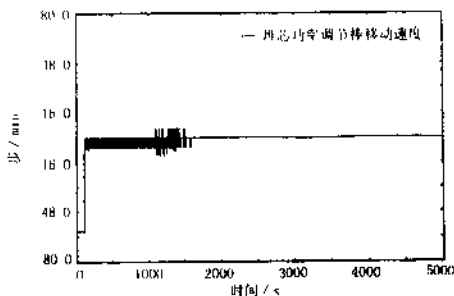


图9 甩负荷时控制棒移动速度变化曲线

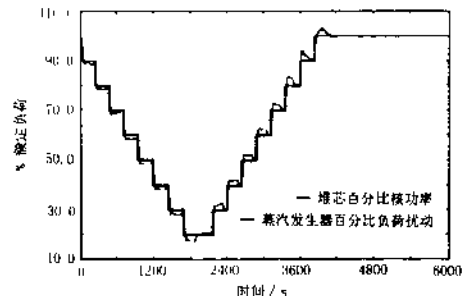


图10 10%阶跃时堆芯功率变化曲线

后,以同样的方式阶跃提升负荷到100%额定负荷。其仿真结果如图10至图15所示。5%线性负荷变化工况设定为从满功率开始以5%额定负荷/min的速度连续降负荷到20%额定负荷,稳定1000s后,以同样的方式线性提升负荷到100%额定负荷。图16至图22为该工况的仿真结果。更多的结果请参阅文献[4]。

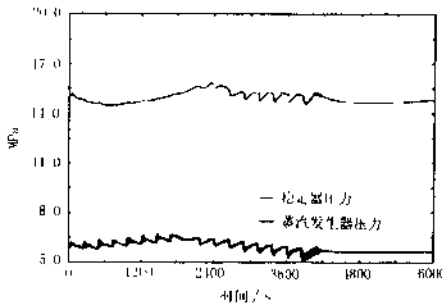


图11 10%阶跃时稳压器和SG压力变化曲线

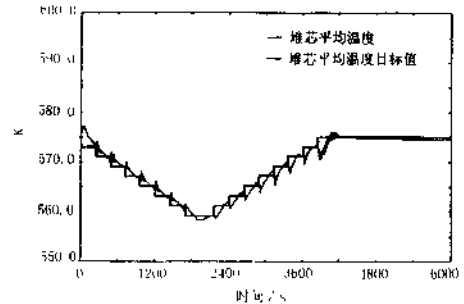


图12 10%阶跃时堆芯平均温度变化曲线

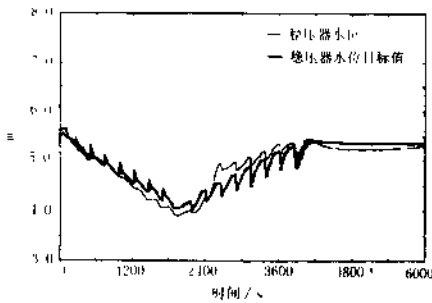


图13 10%阶跃时稳压器水位变化曲线

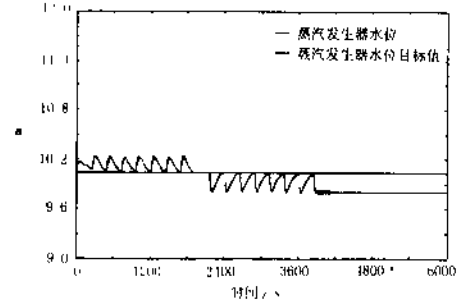


图14 10%阶跃时SG水位变化曲线

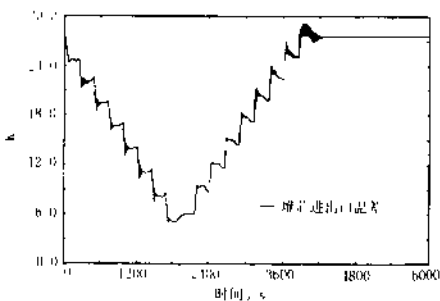


图15 10%阶跃时堆芯进出口温差变化曲线

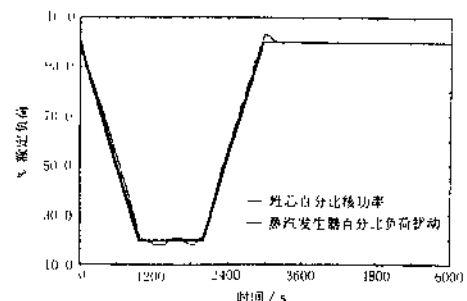


图16 5%线性时堆芯功率变化曲线

由图可见,在三种负荷急剧变化的工况下,控制系统调节过程中堆功率的超调量 $<3\%$,稳压器和蒸汽发生器的水位最大动态偏差 $<3\%$ 。没有出现功率、温度、压力和水位等参数超限值引发紧急停堆,没有触发稳压器安全阀和蒸汽发生器大气释放阀开启,所有被控参数的稳态误差都很小,这些结果与该核电站的实际情况比较吻合,满足三种负荷变化时控制系统设计要求。此外,作者还将NCS程序仿真结果与国外一核电站控制系统仿真程序的相关结果作过比较,两者基本一致,并且从NCS程序的仿真结果得到的控制系统性能指标要更不偏保守。同时NCS程序的界面友好、使用非常简便、能灵活地处理复杂的控制系统,仿真速度快,在MMX200的PC机上,仿真6000s,物理时间只需600s,仿真采样周

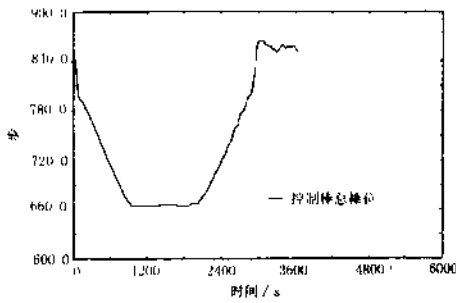


图 17 5%线性时控制棒总棒位变化曲线

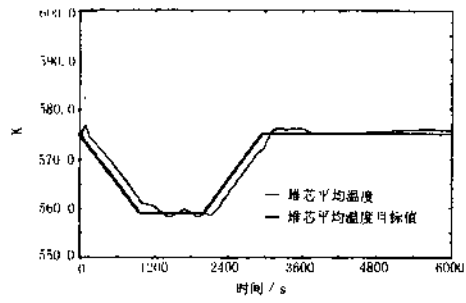


图 18 5%线性时堆芯平均温度变化曲线

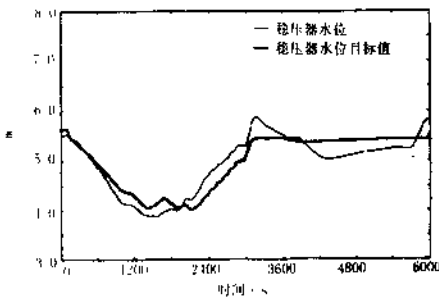


图 19 5%线性时稳压器水位变化曲线

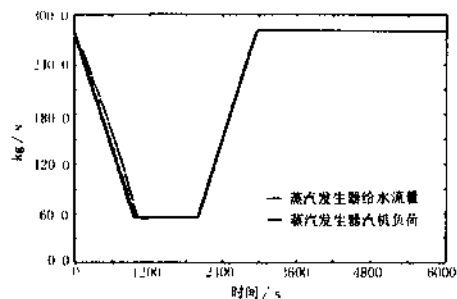


图 20 5%线性时 SG 给水/蒸汽流量变化曲线

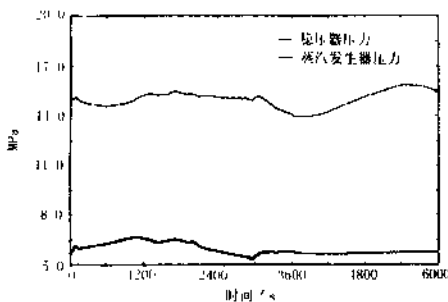


图 21 5%线性时稳压器和 SG 压力变化曲线

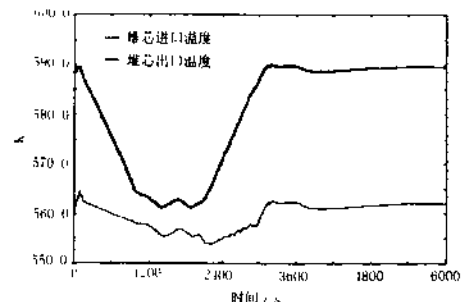


图 22 5%线性时堆芯进出口温度变化曲线

期为 0.01 s, 而此时堆芯的轴向节点为 3 个, 蒸汽发生器的轴向节点为 4 个, 被控对象数学模型由描述系统被控变量变化的 56 个微分方程组成, 这种控制体划分还是比较细的。

上述结果证明了本文所提被控对象微学模型的正确性、所选数值方法的有效性和仿真程序的可靠性。本文工作对开展核电站控制系统仿真研究有较好的参考价值, 研制的仿真程序也有一定的工程价值。资料调研表明, 从仿真功能、范围、速度和精度以及软件使用的方便程度来看, 国内目前尚未发现与 NCS 类似的专用于核电站控制系统的仿真软件。进一步的研究工作目前仍在继续。

参 考 文 献

- 1 干平安等. 核反应堆热工分析. 北京: 原子能出版社, 1986
- 2 Wulff W, et al. The BWR Plant Analyzer. Final Report, NUREG/CR-3943, August 1984
- 3 崔震华等. 压水堆核电站控制系统仿真程序 NCS, 课题研究报告. 清华大学、中国核动力研究设计院, 1998
- 4 赵兆颐等. 反应堆热工流体力学. 北京: 清华大学出版社, 1992
- 5 崔震华等. 稳压器的模型化与仿真. 核动力工程, 1993, 14 (3): 205
- 6 崔震华. PWR 核电站微机型安全分析程序的研制和应用. (博士学位论文), 西安: 西安交通大学, 1992
- 7 徐士良. C 常用算法程序集. 北京: 清华大学出版社, 1994
- 8 王惠刚. 计算机仿真原理及应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 1994
- 9 顾启泰. 系统设计与仿真. 北京: 清华大学出版社, 1995
- 10 熊光楞等. 控制系统仿真与模型处理. 北京: 科学出版社 1993