

# PFBC-CC 燃气轮机系统动态特性 实时混合仿真研究

(东南大学热能工程研究所) 向文国 蔡宁生

**摘要:** 对用两台数字计算机和一台模拟计算机构成的数模实时混合仿真与控制研究系统作了介绍, 讨论了其实现原理和接口软件的结构。并利用所建立的实时混合仿真系统对燃煤增压流化床燃气蒸汽联合循环 (PFBC-CC) 燃气轮机系统动态特性作出了仿真研究, 表明系统使用方便, 实时性好。

**关键词:** 实时; 混合仿真; 控制

中图分类号: TK47; TP391.9

## 1 引言

经过多年科技攻关, 由东南大学热能工程研究所主持的燃煤增压流化床燃气蒸汽联合循环系统 (简称 PFBC-CC) 研究已进入中试调试阶段, 为使系统高效稳定可靠运行, 需要对系统的动态性能作出全面的预测, 设计出性能优良的控制系統。本文是在这一背景下而完成的, 为研究系统动态性能和设计控制系统开发了一个仿真系统。

用数字仿真虽然能满足一般仿真要求, 但是对于 PFBC-CC 如此复杂的热工系统来说, 由于数字仿真时计算工作量巨大, 很难满足实时的要求, 因此我们采取把数字计算机与模拟计算机联合在一起, 构成数模实时混合仿真环境。并且在此基础上, 增设一台数字计算机用于设计控制规律, 进行实时控制仿真。

## 2 实时混合仿真系统的实现

### 2.1 系统配置

系统的配置 (图 1) 主要由以下几部分组成: 两台数字计算机, 分别为 Pentium II 233 (配有多媒体附件) 和 Pentium 150, 一台模拟计算机, 型号为 DMJ130A, 共 12 阶 (12 个积分器), 接口电路部分: A/D 和 D/A 接口板, 两块 NE2000 网卡, 同时还配有打印机, 绘图仪等。

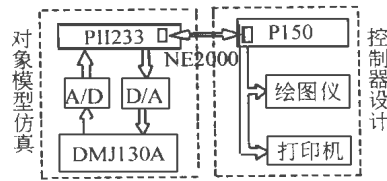


图 1 数模混合仿真系统结构示意图

针对诸如 PFBC-CC 如此复杂的系统来说, 仅以一台模拟机来模拟实际物理对象, 尚不能满足仿真要求。在进行仿真试验装置设计时, 配备一台高

性能计算机 (Pentium II 233), 与模拟机一起共同模拟实际物理对象。这样不但可以提高系统的仿真速度, 而且还可以提高系统的仿真的精度。对象的一些非线性特性, 可以很容易在数字计算机上得到复制。如 PFBC-CC 系统中的烟气轮机, 汽轮机, 压气机等性能曲线能直观地加以再现, 设计出双变量函数发生器或多变量函数发生器, 满足静态与动态拟合要求。对于计算量大, 耗时多的积分运算可在模拟计算机上实现, 以此达到实时要求。

### 2.2 非线性部件的模拟

非线性部件如烟气轮机, 汽轮机, 压气机等二元非线性性能曲线的实现, 通过节点函数查表与函数插值方法相结合的方法实现。使用双线性插值公式: 已知函数  $Z = f(X, Y)$  在四个相邻节点  $(X_i, Y_j)$ ,  $(X_{i+1}, Y_j)$ ,  $(X_i, Y_{j+1})$ ,  $(X_{i+1}, Y_{j+1})$  的函数值分别为  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ , 则在该四个节点所确定的矩形区间内的任意一点  $(X, Y)$  上的函数值  $Z$  由下式决定:

$$Z(X, Y) = \left[ \frac{X - X_i}{X_{i+1} - X_i} (Z_4 + Z_1 - Z_2 - Z_3) + Z_2 - Z_1 \right] \frac{Y - Y_j}{Y_{j+1} - Y_j} + \frac{X - X_i}{X_{i+1} - X_i} (Z_2 - Z_1) + Z_1$$

混合仿真时, 数字计算机充当函数发生器。由于 A/D 与 D/A 选取 12 位, 采样频率最高达 30 kHz, 插值运算速度快, 因而函数发生器静态精度和动态精度能满足实时仿真的要求。

### 2.3 混合仿真实现

设系统对象可用下面表达式表示:

收稿日期: 1998-09-15; 修订日期: 1998-12-29

作者简介: 向文国 (1964-), 男, 江苏泰州人, 硕士讲师, 主要从事热力系统建模、仿真与控制。通讯处: 210096 南京东南大学热能工程研究所  
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$X = f(X, U) \quad (1)$$

$$Y = g(X, U) \quad (2)$$

式中  $X$  为状态量,  $Y$  为输出量,  $U$  为输入量, 式 (1) 表示与时间相关的状态函数, 如具有惯性、蓄能、蓄质特性的一些部件, 式 (2) 为输出方程, 可以由一些部件的特性方程组, 参数联系方程组等推出。根据上述表达式特点, 可以把系统数学模型分解成相对独立的两部分, 一部分是与时间无关的部分, 包括特性方程组、参数联系方程组、微分方程的右函数部分, 在数字计算机上实现; 另一部分与时间直接相关, 进行积分运算, 直接在模拟计算机上实现, 如图 2 所示。

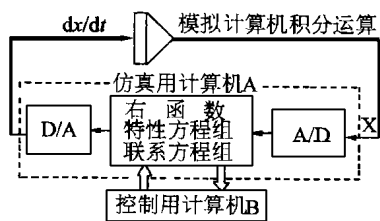


图 2 混合仿真与控制实现原理

当系统高于模拟计算机的 12 阶时, 可以从以下两方面作出近似: 根据对象方程的时间常数, 将变化过程相对较快和较慢的微分方程代数化, 对系统实行降阶处理。把时间常数进行分类, 将相对较慢的方程安排在数字计算机上作积分运算, 这样其精度不变, 但增加了数字机的运算负担, 会影响响应速度。具体方法为: 把方程 (1) 转化为 (3) 和 (4), 其中  $X_1$  为快过程, 其积分 (3) 在模拟计算机上进行,  $X_2$  为变化较慢的状态量, 其积分 (4) 可在数字计算机上计算, 由于  $X_1$ 、 $X_2$  之间相互关联, 一般地当计算步长与 A/D 和 D/A 采样转换步长同步时, 能进行协调运算。但是, 当  $X_2$  的阶数高时, 其计算量大, 此时同步运算很难保证实时性。其计算步长需要跨越两个或更多个采样转换步长, 这时就需要对  $X_1$  值做预估, 并加以修正。图 3 示意计算步长跨越两个采样转换步长时的算法框图,  $X_2$  的算法采用实时二阶龙格库塔方法。

$$X_1 = f_1(X_1, X_2, U) \quad (3)$$

$$X_2 = f_2(X_1, X_2, U) \quad (4)$$

### 2.4 控制机的设置

为了便于闭环控制系统的设计与仿真, 试验装

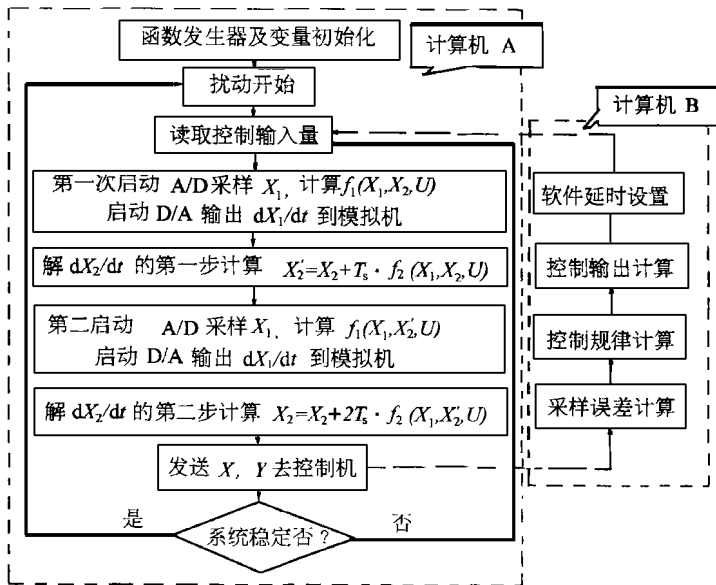


图 3 仿真与仿真软件流程示意图

置增设一台数字计算机 B, 图 2 所示, 用于实时控制研究, 以便对复杂控制规律进行仿真, 同时减少对数字计算机 A 的计算占时, 提高混合仿真的实时性, 考虑到实际过程 A/D 与 D/A 采样转换占用一定时间, 在设计软件时, 通过软件延时 (扣除通讯时间因素) 加以模拟。通过该机可进行对象闭环特性仿真和控制规律设计, 所采集的数据和控制量输出通过 NE2000 通讯网卡实现通讯。

### 2.5 软件设计

系统的所有接口软件、组态以及控制软件, 均在 Win95 下用 Visual C++ 5.0 工具开发, 软件使用直观方便。主要由两部分组成: 仿真组态与实现, 控制组态与实现。

仿真组态用于建立数字计算机 A 与模拟计算机之间的联系, 根据被仿真对象, 建立仿真数学模型。仿真实现软件根据仿真组态内容进行对象特性仿真, 同时实现两台数字计算机之间的通讯: 发送采样数据及读取控制量。软件结构如图 3 所示。

控制组态用于建立被控量与控制规律及状态量之间的关系。控制实现把由数字计算机 A 和模拟计算机组成的实时仿真对象当作被控对象, 进行实时控制。

## 3 PFBC - CC 燃气轮机系统建模与仿真

如图 4 所示, 是经过简化的某一中试电站 PFBC

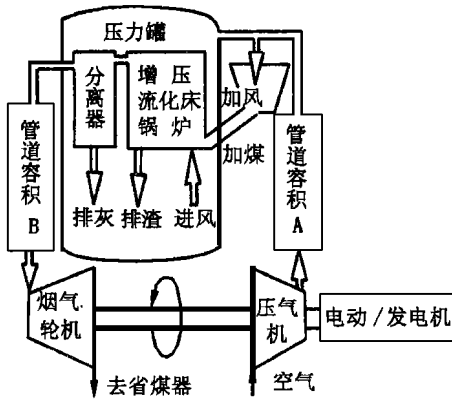


图 4 PFBC - CC简图

- CC系统  
燃气轮机侧  
系统简图。

为了简  
便起见,假  
设增压流化  
床锅炉内温  
度分布基本  
保持不变,  
则可以简化  
燃气轮机系  
统的模型建

$\alpha_1, \alpha_2$ 为烟  
气轮机旁通  
阀与入口阀  
的开启度,其  
它的一些参  
数联系方程  
和输出参数  
和上面表达  
式有相同的  
形式。在实  
际运算中,作  
者通过对上  
述方程组作  
线性化处理,  
简化了运算,  
实现实时混  
合仿真。

控制规律选择 PID方式,由烟  
气轮机进气  
阀门开启度  
 $\alpha_1$ 控制压气  
机烟气轮机  
转子转速  $N$ ,旁通阀门  
开启度  $\alpha_2$ 控制 PFBC锅炉  $P$ 。

把所建模型通过在装置上对甩  
负荷工况进  
行仿真(采  
样频率为 25  
Hz),结果如  
图 5(图中纵  
坐标为相对  
量  $(T - T_0) / T_0$ ,其中  $T_0$   
为设计工况  
值),转子转  
速  $N$ 快速升  
高,烟气轮  
机入口阀门  
开启度  $\alpha_1$ 受  
到控制,PFBC  
炉膛压力随  
着烟气轮机  
入口阀门开  
度  $\alpha_1$ 的变  
小而瞬时升  
高,由于旁  
通阀门  $\alpha_2$ 的  
打开,PFBC

立。其简单模型如下:

3.1 烟  
气轮机与压  
气机转子运  
动方程:

$$K_1 \cdot dN / dt = \Delta M$$

$K_1$  为与转子转动惯量有关的常数,

$N$  为转子转速,  $\Delta M$  为剩余扭矩。

3.2 PFBC  
锅炉容积效  
应:

$$K_2 \cdot dP / dt = \Delta G$$

$K_2$  为与 PFBC 锅炉容积和温度相  
关的系数,  $P$  为 PFBC 炉内平均压力,  $\Delta G$   
为进出 PFBC 的质量流量差。

3.3 压力罐和管道 A 合在一起考虑,因空气温度  
相对较低,只考虑其容积效应:

$$K_3 \cdot dP_2 / dt = \Delta G_2$$

$K_3$  为与压力罐和管道 A 容积和空气温度相  
关的系数,  $P_2$  为其内平均压力,  $\Delta G_2$  为该部分的质量流  
量差。

3.4 分离器  
和管道 B 因  
燃气温度相  
对较高,除  
容积效应,还  
应考虑能量  
效应:

$$K_4 \cdot dP_3 / dt = \Delta G_3$$

$$K_5 \cdot dT_3 / dt = \Delta Q$$

$K_4$  为与分离器  
和管道 B 容  
积相关的系  
数,  $K_5$  为与  
分离器和管  
道 B 容积及  
燃气体质相  
关的系数,  $P_3$   
为其内平均  
压力,  $T_3$  其  
内平均温度,  
 $\Delta G_3$  为进出  
该部分的质量  
流量差,  $\Delta Q$   
为进出该部  
分的能量流量  
差。结合压气  
机、烟气轮机  
和电动发电  
机的部件特  
性方程及各  
部分的参数  
联系方程,可  
以推出:

$$\Delta M = f_1(N, P_3, T_3, \alpha_1, \alpha_2)$$

$$\Delta G = f_2(P, P_2, P_3, T_3)$$

$$\Delta G_2 = f_3(N, P_2, P)$$

$$\Delta G_3 = f_4(N, P, P_3, T_3)$$

$$\Delta Q = f_5(N, P, P_3, T_3)$$

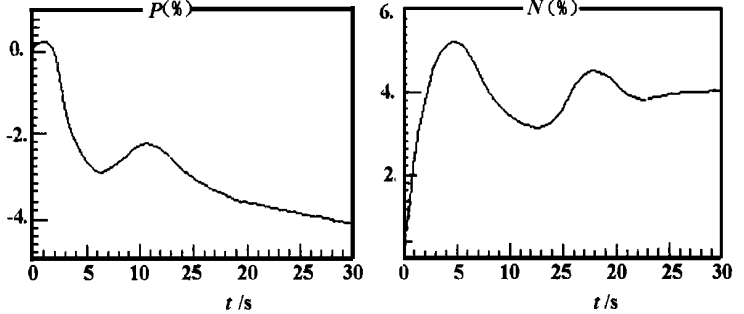


图 5 甩负荷时转子转速  $N$  和 PFBC 锅炉压力  $P$  的变化曲线

锅炉  $P$  下降,大约 25 秒后达到平衡

### 4 结论

从对燃煤增压流化床联合发电系统烟  
气侧动态特  
性仿真计算  
的结果来看,  
用文中的数  
模混合仿真  
方法研究动  
态特性简单  
可行,具有  
实时性好、  
使用方便等  
优点,可用  
于其它热工  
系统动态特  
性的仿真与  
控制系统设  
计。

### 参考文献

- [1] 向文国. 能量回收系统动态特性离散分析. 东南大学学报, 1992, 22(5): 123~ 130.
- [2] 向文国. 增压流化床联合循环系统控制前景. 燃气轮机技术, 1993, 6(2): 28~ 31.
- [3] 苏 明. 博士学位论文, 上海交通大学, 1987.
- [4] 何克忠. 计算机控制系统分析与设计. 清华大学出版社, 1988.
- [5] 章臣榭. 锅炉动态特性及其数学模型. 水利电力出版社, 1986.
- [6] Volker Weß. Mathematische Modellierung Zirkulierender Wirbelschichten für die Kohleverbrennung, Dissertation, Universität - Gesamthochschule - Siegen, Germany, 1987.
- [7] Kool M. Dynamic modeling and identification of a coal - fired pressurized fluidized bed combustor, dissertation. Technical University Delft, Holland, 1985.

(复 编)

the quantitative effect on machine unit economic performance of exhaust steam pressure variation by employing the theory of equivalent enthalpy drop. Calculation results of specific examples show that the method features simplicity of use as well as high precision and practicality. Its calculation error is lower than that of other currently available engineering methods. **Key words** exhaust pressure, quantitative method, economy, equivalent enthalpy drop

PFBC-CC燃气轮机系统动态特性实时混合仿真研究 = **A Real-time Hybrid Simulation Study of the Dynamic Characteristics of a PFBC-CC Gas Turbine System** [刊,中] / Xiang Wenguo, Cai Ningsheng (Thermal Engineering Institute under the Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 356~ 358

Described in this paper is a real-time hybrid simulation and control study system based on two digital computers and an analog computer. Discussed are the theory of system realization and the process structure of its interface software. A simulation study has been conducted of the gas turbine system dynamic characteristics of a coal-fired supercharged fluidized bed gas-steam turbine combined cycle. The results of the study indicate that the system under discussion enjoys ease of use and high real-time quality. **Key words** real time, hybrid simulation, control, PFBC

热阻和回热损失对埃里克森循环性能的影响 = **The Effect of Thermal Resistance and Regeneration Loss on Ericsson Cycle Performance** [刊,中] / Lin Bihong, et al (Physics Department of Quanzhou Normal Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 359~ 362

An Ericsson cycle model under the influence of thermal resistance and regeneration loss is established and a basic optimization relation of the cycle deduced, using output power as a target function. Characteristic curves of the cycle are thus obtained. A fairly detailed discussion is conducted of a series of special operating conditions with some new conclusions being obtained. **Key words** Ericsson cycle, thermal resistance, regeneration loss, basic optimization relation, characteristics curves

内旋流流化床燃烧系统设计研究 = **Design and Study of an Internal Circulating Fluidized Bed Combustion System** [刊,中] / Tian Wendong, Wei Xiaolin, Sheng Hongzhi (Institute of Mechanics under the Chinese Academy of Sciences) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 363~ 366

Based on the calorific value of municipal solid waste, its physical composition analysis and the cold-state test results of fluidized bed air distribution the authors have conducted the study of an internal circulating fluidized bed (ICFB) combustion system. A hot-state test plant for the ICFB combustion system was designed and a combustion test of municipal solid waste successfully carried out. **Key words** fluidized bed, internal circulating fluidized bed, combustion, municipal solid waste, heat transfer

结构参数对煤粉浓缩能力影响的试验研究 = **Experimental Study of the Effect of Structural Parameters on the Concentrating Ability of Pulverized-coal Concentrators** [刊,中] / Shi Liming, et al (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 367~ 368, 402

The concentrating ability of two types (i. e., brent and shutter) of pulverized-coal concentrators was investigated and tested. The test results show that it is feasible to shorten the length of guide plate in a primary air pipe duct. To achieve a bias concentration ratio satisfying the requirements of stable combustion under a proper bias air ratio, the authors have specified the variation range of the following 1. the guide plate height for the brent and shutter; 2. the distance between the concentrator and the guide plate. **Key words** pulverized-coal concentrator, brent, shutter, structural parameters

标准椭球形封头螺纹烟管 DZL系列锅炉设计 = **Design of Threaded Flue Tube DZL Series Boilers with Standard Elliptical Heads** [刊,中] / Chen Ming, et al (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 369~ 370

Given in this paper are the basic construction form and conspicuous advantages of threaded flue tube DZL