

# 核蒸汽轮机系统数模混合实时仿真

于明义 黄善衡 翁史烈

(上海交通大学)

〔摘要〕本文建立了核动力装置蒸汽轮机系统的数学模型和数模混合实时仿真模型,考虑了汽水分离器 MS (Moisture Separator) 容积惯性和热惯性对系统的影响,在 DO RNI ER960 数模混合仿真系统上进行了核动力蒸汽轮机系统动态性能的实时仿真。

关键词: 核动力, 蒸汽轮机, 实时仿真

分类号 TK26

## 0 引言

随着化石能源的日渐枯竭,核能资源越来越受到重视,核动力装置倍受青睐。同时,也要求核动力装置性能更加优越、安全。为了设计出高效、安全的系统,必须对动力装置动态性能、控制规律和控制系统的安全性进行分析。计算机仿真,成为进行这种分析的一种有效工具。根据仿真结果,研究者可以得到在给定条件下系统的性能和系统在运行过程中的各种参数。因此,计算机仿真给我们研究动力装置提供了很大的便利。本文建立了核蒸汽轮机系统的数学模型和数模混合实时仿真模型,并在 DO RNI ER960 数模混合仿真系统上进行了核蒸汽轮机系统动态性能的实时仿真。

## 1 蒸汽轮机系统的数学模型

图 1 为核动力蒸汽轮机系统的示意图。与火电机组不同的是,核蒸汽轮机的工作介质大多为饱和蒸汽,整个高压缸处于湿蒸汽区,一般在高压缸出口湿度已经增加到 10~13%,如果蒸汽直接送到低压缸继续膨胀做功,当其达到凝汽器压力时,排汽湿度将会增加到 20~25%,其结果,除了导致汽轮机内效率大大降低以外,还会造成汽轮机内部件的严重水

蚀,以至机组无法正常工作。因此,在核动力机组中必须设置汽水分离器 MS (Moisture Separator)。

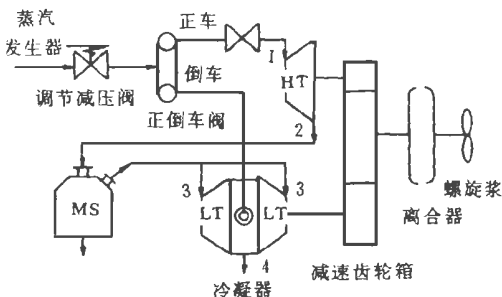


图 1 核动力蒸汽轮机系统简图

对于这样一个复杂、非线性系统可用三类方程组来描述其动态过程<sup>[1]</sup>: (1) 惯性环节的微分方程组; (2) 部件特性方程组; (3) 参数联系方程。其中的惯性环节方程又包含三类: 转子的转动惯性; 汽轮机通流部分及各部件间通道的容积惯性; 各部件及通道的热惯性。对容积惯性而言,由于汽轮机本体中蒸汽流速高、流程短,故本体中的容积可以略去。但核汽轮机所特有的机外汽水分离器 MS 的容积相对较大,是必须考虑的。同时,由于汽水分离元件金属波纹板有较大的热容量,在机组发生动态变化时,若其温度与循环蒸汽温度存在差别,那么,将产生变化,使 MS 中的循环蒸汽冷凝(或蒸发)一部分,从

而给机组带来一定的热惯性。因此在惯性环节中考虑转子的转动惯性及 MS 的容积惯性和热惯性。这些环节是时间  $t$  的微分方程,在实时仿真过程中,用模拟积分器的运算来求解。部件特性方程和参数联系方程大多是非常复杂的非线性方程,与时间  $t$  无关的环节,我们事先预处理输入输出关系,设置于函数发生器中。

### 1. 1 流量与压力的关系

由船用汽轮机原理与热计算可知<sup>[2]</sup>,在级数较多时汽轮机的流量变化可表示为:

$$\frac{G}{G'} = \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_1'^2 - p_2'^2} \frac{T_1}{T_1'} \quad (1)$$

萨莫尔洛维奇和特洛雅夫斯基<sup>[2]</sup>在他们的有关汽轮机变工况专著中认为转速的变化对变转速汽轮机流量的影响并不是很严重。在我们所研究的情况中忽略转速变化对流量的影响。

对于核汽轮机所使用的饱和蒸汽而言,饱和温度和饱和压力并不是两个独立的参数,可以把饱和温度表示为饱和压力的函数。由此我们可以把流过汽轮机的流量表示为其进出口压力的函数,即

$$G = G(p_1, p_2) \quad (2)$$

在舰船核动力机组中,通常是以汽轮机的流量  $G$  来表征其负荷的大小,同时也是借助流量  $G$  反馈至一回路来实现堆、机功率的匹配调节。在舰船核动力装置中,调节级后的压力  $P_r$  是个十分重要的参数,因此我们可以把流过汽轮机高压缸的流量  $G_{HT}$  整理成  $P_r$  和高压缸排汽压力  $P_2$  的函数,而把低压缸流量  $G_{LT}$  整理成其进出口压力  $P_3$  和  $P_4$  的函数,即:

$$\begin{cases} G_{HT} = G(P_r, P_2) \\ G_{LT} = G(P_3, P_4) \end{cases} \quad (3)$$

### 1. 2 转子的转动惯性微分方程

在工况变化时,汽轮机的主动转矩和螺旋桨的负荷转矩都会发生变化,两者的不平衡将引起转速的变化。由动量矩方程可得:

$$\frac{J}{30} \frac{dn}{dt} = Q_{HT} + Q_{LT} - Q_P = \Delta Q \quad (4)$$

式中:  $J$ ... 转动惯量;

$n$ ... 转速;

$Q_{HT}$ ... 高压缸产生的力矩;

$Q_{LT}$ ... 低压缸产生的力矩;

$Q_P$ ... 螺旋桨吸收的力矩 (包含克服摩擦所耗的功率)。

力矩  $Q_{HT}$  和  $Q_{LT}$  是各自进出口压力及转速  $n$  的函数,如果用函数发生器来复制这两个函数,都必须用三变量函数发生器。为了函数复制的方便,我们假定  $Q_{HT}, Q_{LT}$  仅是各自进出口压力的函数,同时加上因转速  $n$  的变化所作的修正,即

$$\begin{cases} Q_{HT} = Q_{HT}(p_r, p_2) + \frac{\partial Q_{HT}}{\partial n} \Delta n \\ Q_{LT} = Q_{LT}(p_3, p_4) + \frac{\partial Q_{LT}}{\partial n} \Delta n \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\Delta n = n - n_0$  即动态转速  $n$  与稳态转速  $n_0$  之差。

$\frac{\partial Q_{HT}}{\partial n}$  和  $\frac{\partial Q_{LT}}{\partial n}$  可通过下式根据汽轮机本身的特性预先计算求得。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_{HT}}{\partial n} = \frac{Q_{HT}(n + \Delta n, p_r, p_2) - Q_{HT}(n, p_r, p_2)}{\Delta n} \\ \frac{\partial Q_{LT}}{\partial n} = \frac{Q_{LT}(n + \Delta n, p_3, p_4) - Q_{LT}(n, p_3, p_4)}{\Delta n} \end{cases} \quad (6)$$

而螺旋桨吸收的力矩 (包含克服摩擦所耗的功率) 视为只与转速有关,即  $Q_P = Q_P(n)$ 。

### 1. 3 MS 的热惯性

设金属板质量为  $M$ , 热容量为  $C$ , 温度为  $T_1$ , 其与循环蒸汽的热交换量为  $\Delta q$ 。根据能量平衡方程,可以得出:

$$MC \frac{dT_1}{dt} = \Delta q \quad (7)$$

根据前面的分析,  $\Delta q$  为循环蒸汽和金属波纹板温度的函数。由于循环蒸汽的温度和压力为一一对应的关系,这样我们就可以把  $\Delta q$  整理成循环蒸汽压力  $P_{MS}$  和金属波纹板温度  $T_1$  的函数。同时,假定单位蒸汽冷凝放热量为  $r$  ( $P_{MS}$ ), 冷凝量为  $\dot{m}$

$$\dot{m} = \frac{\Delta q}{r(P_{MS})} \quad (8)$$

### 1. 4 MS 的容积惯性方程

设在单位时间内流入 MS 的蒸汽流量为  $G_2$ , 流出 MS 的流量为  $G_3$ , MS 分离出来的水分为  $G_d$ , 则在稳态工况时  $G_2 = G_3 + G_d + \dot{m}$ 。又设 MS 的容积为  $V$ , MS 中的压力为  $P_{MS}$ , 密度为  $\rho_{MS}$ , 则由质量连续方程可得:

$$V \frac{d\rho_{MS}}{dt} = G_2 - (G_3 + G_d + \dot{m}) = \Delta G_{MS} \quad (9)$$

假设其中的蒸汽变化为多变过程, 多变指数为  $k$ , 则汽水分离器的容积惯性方程可写成以下的形式:

$$\frac{V \cdot \rho_{MS} dP_{MS}}{k P_{MS} dt} = G_2 - (G_3 + G_4 + \dot{m}) = \Delta G_{MS} \quad (10)$$

式 (10) 即为 MS 的容积惯性微分方程。

## 2 蒸汽轮机系统的实时仿真

### 2.1 实时仿真的排题图

实时仿真在 DO960 数模混合仿真系统上进行，

由模拟计算机、数字计算机和将这两者连接起来的中间接口三大部分组成，兼有模拟机的高速并行处理能力和数字机的强有力的存储和逻辑功能，特别适合于复杂系统快速动态过程的实时仿真。图 2 为实时仿真的模拟排题图，系统为闭环。图中函数发生器  $F_1$  与  $F_2$  分别产生稳态流量  $G_0$  与流量增量  $\Delta G$ ，它们都被设置为转速  $n$  的函数，只要改变  $F_2$  中的  $\Delta G$  设置便可改变汽轮机系统的动态过程。

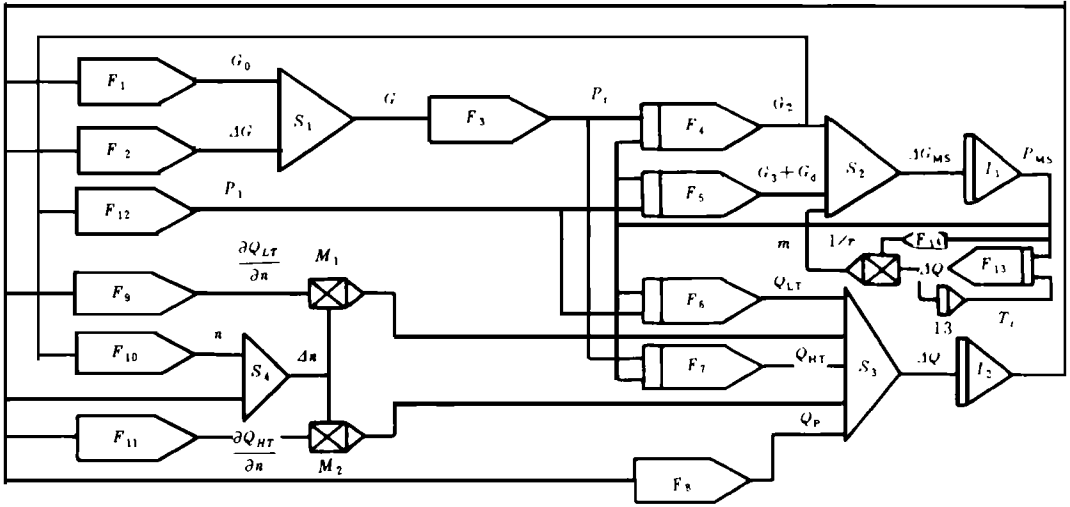


图 2 模拟排题图

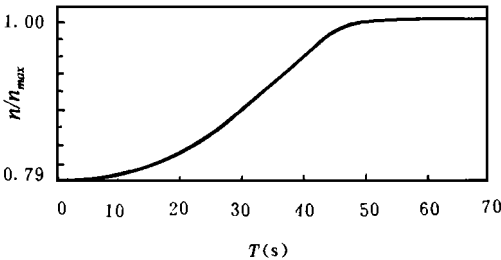


图 3 50% 工况至 100% 工况结果曲线

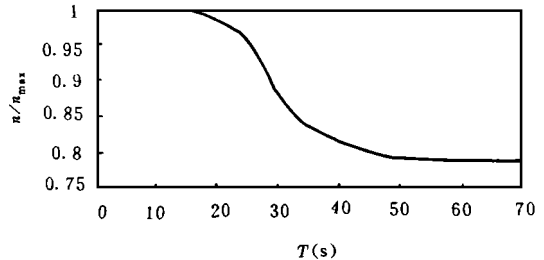


图 4 100% 工况至 50% 工况结果曲线

函数发生器  $F_3$  复制调节级后压力  $P_1$  与流量  $G$  之间的关系。双变量函数发生器  $F_4$ 、 $F_5$  和加法器  $S_1$ 、积分器  $I_1$  则按照式 (10) 的关系来求解 MS 中的压力  $P_{MS}$ 。函数发生器  $F_{12}$  复制排汽背压  $P_4$  与蒸汽流量之间的关系。高低压缸的力矩  $Q_{HT}$  和  $Q_{LT}$  分别由双变量函数发生器  $F_7$  和  $F_6$  产生。  $F_9$ 、 $F_{10}$  和  $F_{11}$  三个函数发生器及加法器  $S_4$ 、两个乘法器  $M_1$ 、 $M_2$  用于产生转速  $n$  对力矩的修正量，螺旋桨力矩  $Q_p$  由  $F_8$  产生。经过加法器  $S_3$  便可求得转子的剩余力矩  $\Delta Q$ ，再经过  $I_2$

的积分即可求得转速  $n$ 。  $F_{13}$  和  $F_{14}$  发生器以及积分器  $I_3$  用来产生金属板温度。

### 2.2 实时仿真及结果

利用上述实时仿真模型在 DO960 上进行了加速减速动态过程的实时仿真研究，并进行了多种加速减速方案的比较。

图 3 所示为 50% 工况 ( $n = n/n_{max} = 0.79$ ) 加速至 100% 工况 ( $n = 1.0$ ) 的加速过程中转速结果曲线。转速  $n$  由 0.79 加速至 1.0 需要 60 秒。我们还与实

际运行结果作了比较,从曲线上可以看出二者非常接近,最大误差不超过 0.5%,这说明我们建立的数学模型是正确、合理的。图 4 所示为 100% 工况减至 50% 工况的减速过程中转速结果曲线。图 5 所示为 50% 工况加速至 100% 工况的三种不同的加速方案。方案 1 的加速过程最快,  $n$  由 0.79 加速至 1.0 仅花了 36 秒。方案 2 的加速时间为 48 秒。方案 3 的加速

时间为 60 秒。从  $\Delta Q/Q_{\max}$  曲线也可以看出,方案 1 变化最剧烈,  $\Delta Q/Q_{\max}$  的最大值比其他两种方案均要大。从舰船的机动性考虑当然希望动力装置的动态过程越快越好,但是功率变化太快会使汽轮机产生较大的热应力和机械负荷,而且还应考虑一回路与二回路间的匹配问题。因此,我们可以通过实时仿真对不同方案进行选优。

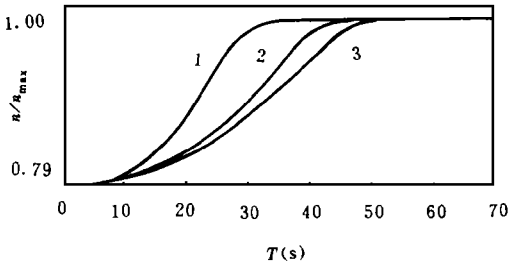
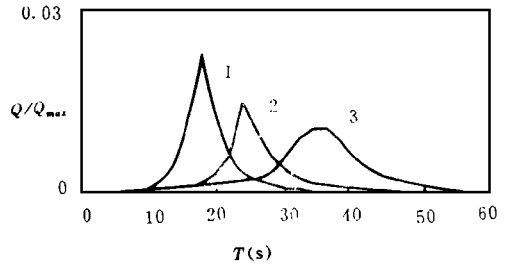


图 5 50% 工况至 100% 工况不同加速方案结果曲线



### 3 结论

(1) 本文建立了核动力装置蒸汽轮机系统的数学模型和数模混合实时仿真模型。该模型考虑了 MS 容积惯性和热惯性对系统动态性能的影响。从仿真结果看出该模型是正确和合理的,它可以对核汽轮机的加减速过程进行动态实时仿真。

(2) 汽水分离器是一个惯性环节,由于它的存在使系统的响应产生延滞。在所研究的一个加速过程中(MS 的容积为  $4.4\text{m}^3$ ,转子的转动惯量为  $13\,500\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ) 因 MS 的容积惯性和热惯性而产生的时间延滞达 4.2 秒,影响是明显的。但是 MS 更主要的

影响是在甩负荷过程中,它可能造成严重的超速,危及汽轮机的安全。因此在轮机系统设计时对 MS 进行仿真研究是重要的。

### 参 考 文 献

- 1 翁史烈主编,数模混合仿真及其应用.上海科学技术出版社,1991年9月
- 2 钟芳源,王希季编.船舶汽轮机原理与热计算.上海交通大学出版社,1964年
- 3 于明义.舰船核动力装置蒸汽轮机系统数模混合实时仿真.上海交通大学硕士论文,1993年2月

(渠 源 编 辑)

作者简介 于明义,男,1970年生,1992年毕业于哈尔滨船舶工程学院,获工学学士学位,同年9月进入上海交通大学动力机械工程系,在翁史烈院士、黄善衡教授的指导下攻读硕士学位,1994年获工学硕士学位,同年9月继续攻读博士学位。参加了09核潜艇动力装置动态性能的数模混合实时仿真课题的研究工作,目前主要从事常规动力装置和核动力装置的动态性能研究及其计算机实时仿真。(通讯处 200240 上海交大 94BA1)

# 欢迎您还是我们的作者与读者

**Air Preheaters in Utility Boilers** [刊,中] / Yan Weiping, Shan Wei, Jiang Ping (Northeast Electric Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 416~ 418

An investigation and study of the operation of heat pipe air preheaters in some utility boilers and the thermodynamic calculation results of various schemes involving the replacement of a low-temperature pipe air preheater by a heat pipe preheater for a 200 MW coal-fired boiler have shown that the installation of a heat pipe air preheater for a drastic reduction of exhaust gas temperature is very irrational from technical and economic viewpoints. This paper also presents methods for justifying the adoption of various modification decisions. **Key words** boiler, heat pipe type air preheater, economic analysis

**引射器特性的实验研究和理论分析 = Experimental Study and Theoretical Analysis of an Ejector Behavior**

[刊,中] / Li Xueliang, Yang Ruichang (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 419~ 423

On the basis of an experimental study the behavior of an ejector is analysed and studied. Furthermore, the calculation method of flow characteristics for an ejector-mounted circuit system is given, which has practical value in engineering applications. **Key words** ejector, hydrodynamic characteristics, experimental study, theoretical analysis

**炉内喷钙脱硫实验研究 = Experimental Study of Limestone Desulphurization in Pulverized Coal-fired Boilers**

[刊,中] / Yao Hong, Zhou Jianping, et al (Central China University of Science and Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 424~ 428

The influencing factors of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions are discussed under the conditions of limestone desulphurization in pulverized coal-fired boilers. The test results show that the SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions are heavily dependent on such factors as furnace temperature, Ca/S, sorbent particle size, coal type, excess air coefficient, etc. Also studied in this paper is the effect of various types of coal under different Ca/S ratios on slagging, fouling, ash load, fly ash carbon content and specific electrical resistance. **Key words** desulphurization ratio, slagging, fouling, Ca/S ratio, electrical precipitator

**S1A-02燃气轮机箱装体隔声设计与试验研究 = The Acoustic Design and Experimental Study of a S1A-02 Gas Turbine Package**

[刊,中] / Wang Xu, Tian Yuchun, Liu Jiancheng (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 429~ 433

Based on the analysis of S1A-02 gas turbine noise and frequency spectra the authors have provided the related acoustic design parameters for the S1A-02 gas turbine package. The operation test has shown that the said package features a good sound-isolation performance, which approaches the world advanced level of sound-proof quality of gas turbine packages. **Key words** gas turbine, package, noise, frequency spectrum

**核蒸汽轮机系统数模混合实时仿真 = The Hybrid Real-time Simulation of a Nuclear Steam Turbine System**

[刊,中] / Yu Mingyi, Huang Shanheng, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 434~ 437

This paper describes a mathematical model and a hybrid digital/analog real-time simulation model for the analysis of a nuclear submarine plant steam turbine system. With the effect of moisture separator volume inertia and thermal inertia on the system being taken into account a real-time simulation of the dynamic behavior of nuclear steam turbine system was conducted on a Dornier 960 hybrid simulation system. **Key words** nuclear

power, steam turbine, real-time simulation

采用热天平研究煤粉燃烧特性时氧通量的计算 = **The Calculation of Oxygen Flux During the Study of Pulverized Coal Combustion Characteristics with the Help of a Thermobalance** [刊,中] /Zhu Qunyi, Zhao Guangbo, et al ( Harbin Institute of Technology ), Lu Wei ( Harbin University of Science & Technology ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 438~ 441

Described in this paper is the method of calculating the oxygen flux through a crucible outlet section during the study of pulverized coal combustion characteristics with the use of a thermobalance. Through the analysis and calculation of combustion characteristic curves of Zhi Jin coke it is found that the oxygen needed for the combustion of a sample was transferred to the sample layer surface in a diffusion mass transfer manner through the crucible outlet section. The oxygen partial pressure and oxygen flux on the sample layer surface can be determined by the use of Fick's diffusion law. **Key words** thermobalance, pulverized coal combustion, oxygen flux

电厂锅炉锅筒寿命计算 = **The Calculation of the Boiler Drum Life of a Utility Boiler** [刊,中] /Wang Yunmin ( Changsha Electric Power Institute ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 442 ~ 444

On the basis of an analysis of fatigue-caused life loss during the operation a boiler drum this paper presents a method for calculating the fatigue life of a boiler drum taking into account its wall temperature distribution, thermal stress cycle, mechanical stress and cycle stress amplitude, etc. With the boiler of Huaibeï Power Station being taken as an example calculated is the fatigue life of the boiler drum. **Key words** boiler drum, temperature field, stress, fatigue life

锅筒式蒸汽锅炉水处理工艺设计计算 = **Calculation of the Water Treatment Technological Design of a Drum Type Steam Boiler** [刊,中] /Kuang Pingjian ( Boiler & Pressure Vessel Inspection Institute Under the Harbin Municipal Labor Bureau ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 445~ 447

With some specific examples a fairly detailed description is given of the method for calculating the water treatment technological design of a steam boiler. Through the organic integration of the boiler and the relevant calculations of the water treatment the demineralized water quantity required by the boiler is determined on the basis of the boiler parameters, operating conditions and water quality data. Finally, the various performance parameters of the water treatment equipment are identified. Such an approach makes it possible to eliminate the inconveniences of the feedwater treatment design method when only calculation formulas are given and the demineralized water quantity required by the boiler is assumed to be a known quantity. In conclusion, the method of designing regeneration equipment is also presented, thus further improving the water treatment technological design. **Key words** boiler water treatment, ion exchanger, drum type steam boiler

鳍片分离式浓淡燃烧器的开发与应用 = **The Development and Application of Fin-separation Type Dense-dilute Burners** [刊,中] /Miao Changxin, Li Kai, Li Jiansheng ( Shandong Electric Power Scientific Research & Test Institute ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 448~ 451

It is possible to improve combustion stability by properly increasing the concentration of pulverized coal. On the basis of an experimental study a versatile, low-resistance and high-efficiency fin-separation type dense-dilute burner has been developed. By bringing the pulverized coal concentration to an optimum value to facilitate