

# 汽包水位晃动水动力学模型的实验验证

曹小玲<sup>1</sup>, 刘凯旋<sup>1</sup>, 刘永文<sup>2</sup>, 苏 明<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 能动学院, 湖南 长沙 410076 2 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘 要:** 为验证汽包水位晃动水动力学模型的有效性, 开发了汽包水位水动力学机理模型, 根据实验要求设计和建立了实验台架, 在此基础上进行了实验研究, 结果表明: 汽包水位晃动的实验结果与模型计算结果在波动周期上基本吻合, 数值误差在 ±10% 以内; 就波动幅度和相位而言, 它们之间存在着一定的误差, 但是误差在 ±20% 以内, 可以满足研究工作的需要, 为进一步建立完整汽包水位晃动模型奠定了必要基础。

**关 键 词:** 联合循环; 余热锅炉; 汽包水位晃动; 水动力学模型; 模块化建模

中图分类号: TK229.92 文献标识码: A

## 引 言

余热锅炉作为联合循环的关键部件, 其汽包水位控制是锅炉及联合循环系统安全运行的焦点, 它的控制实现极大地影响余热锅炉运行和联合循环的主要性能。目前, 国内外不少研究人员就余热锅炉建模做了大量有意义的研究工作, 如高建强、郝娜等人采用模块方法对余热锅炉进行动态建模研究<sup>[1]</sup>, 做过类似工作的还有崔凝、王兵树和 Marie Noelle 等人研究余热锅炉的动态特性<sup>[2~3]</sup>, 并为系统控制提供了有力支持; 同时, 裘浚隽、杨瑜文和 Kazuyoshi Kunitom 等人采用传递函数方法进行建模研究<sup>[4~5]</sup>; 王广军等人采用先进神经网络对锅炉热力系统进行动态研究<sup>[6]</sup>。但是到目前为止, 还未见有关对大容量余热锅炉汽包水位晃动进行建模研究的文献报道。

自然循环余热锅炉运行时汽包水位一直在波动, 它们的形成机理比较复杂, 并且目前的汽包水位控制基本上都没有考虑汽包水位的不断晃动给控制系统带来的巨大负面影响。随着联合循环系统对汽包水位控制要求的提高, 如何建立汽包水位晃动模

型及消除汽包水位晃动给控制系统带来的负面影响已成为一个极具挑战性的研究课题。为了对这项研究课题进行探索性研究, 本研究工作在美国通用电气公司 (GE) Edison 研究基金项目等的支持下, 对基于水位晃动的汽包水位水动力学模型的建模进行了探讨, 根据实验需要设计和建立了水动力学模型验证的实验台架, 并进行了相关实验研究, 实验结果从水动力学角度验证了模型的正确性。

## 1 基于水位晃动的汽包水位水动力学模型的建模

根据模块化建模的思想<sup>[7~10]</sup>, 基于 Easy5 软件平台对汽包水位进行了模型开发, 得到的汽包水动力学模型如图 1 所示<sup>[8~10]</sup>, 建模研究及相关细节见文献 [4], 模型中模块使用的是质量、动量守恒方程。

汽包水的质量守恒:

$$\frac{dM}{dt} = W_e - W_i \quad (1)$$

式中: 左边一项表示质量变化率; 右边第一项表示模块总的质量输入流量; 第二项表示模块总的质量输出流量。

汽包水的动量守恒:

$$\frac{d(M\bar{V})}{dt} = (W_e \bar{V}_e - W_i \bar{V}_i) + \xi (P_e A_e + P_i A_i) - \xi P_{\tau w} - \xi M \dot{v} \quad (2)$$

式中: 左边一项表示模块的动量变化率; 右边第一项表示由于速度流入和流出引起的动量变化率, 第二项表示由于模块之间压差引起的动量变化率, 第三项表示摩擦力引起的动量变化率, 最后一项表示重力引起的动量变化率。

收稿日期: 2009-05-12 修订日期: 2010-01-25

基金项目: Edison research foundation From General Electric (GE) in USA(200310); 国家“863”计划基金资助项目(2009CB219803-02); 湖南省高校创新平台基金资助项目(09K069)

作者简介: 曹小玲(1974-), 男, 湖南郴州人, 长沙理工大学副教授, 博士后。

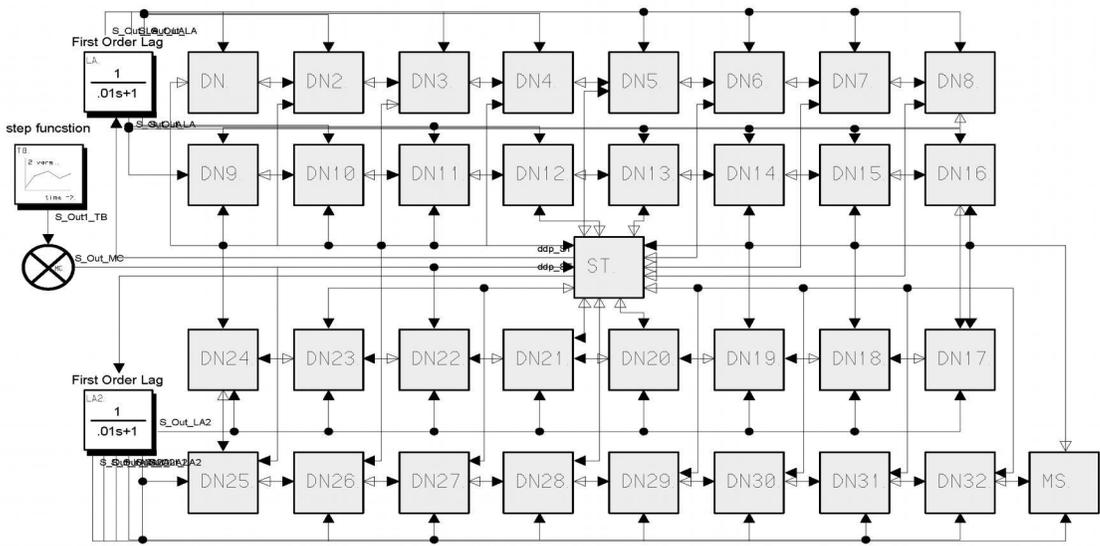


图 1 基于 Easy5 软件平台的汽包水位水动力学模型结构

将式 (1) 和式 (2) 的左边化简为:

$$\frac{dM}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} + V \frac{d\rho}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d(M\bar{V})}{dt} = \frac{1}{A} V \frac{dw}{dt} + \frac{1}{A} w \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

将式 (3) 和式 (4) 代入式 (1) 和式 (2), 并建模假设进一步简化, 可得:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{w_e - w_l}{\rho A} \quad (5)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{w_{e\nu_e} - w_{l\nu_l} + \rho g (h - h_0) A - \frac{w}{A} \frac{dV}{dt} - \Delta P_A}{V/A} \quad (6)$$

式中:  $h$ —模块中液体的高度, m;  $w_e$ —模块总的质量流入流速;  $w_l$ —模块总的质量流出流速;  $\rho$ —密度;  $A$ —液体的横截面积,  $m^2$ ;  $A$ —液体的竖截面积,  $m^2$ ;  $w$ —模块中整个液体流动的质量流速,  $kg/s$ ;  $V$ —模块中整个液体的体积,  $m^3$ ;  $\tau_w$ —摩擦阻力系数;  $\Delta P$ —摩擦阻力系数;  $\Delta P$ —摩擦阻所造成的压力损失, Pa

## 2 实验台架的设计及组成部分

### 2.1 实验台架的设计

根据水位晃荡实验研究的需要, 研究针对机理性实验台架进行了设计, 其中主要组成部分—水槽设计的高度为 0.4 m 长为 1.3 m 宽为 0.2 m 并且两端底部开有两个直径为 26 mm 的带内罗纹圆孔, 用来连接下降管以及流量计, 同时设计了一个给水

分配管, 长度为 1 m 并在分配管的两侧均匀布置了两组小孔, 其直径为 2 mm。整个水槽的材质为有机玻璃, 给水分管材质为塑料。如图 2 所示<sup>[4]</sup>, 由于建立真实汽包的费用高昂, 并且要基于真实汽包进行实验也是非常困难的, 而且实验台的目的是为了用实验来研究水位晃荡的规律以及验证水动力学模型的正确性, 所以在实际的实验台中用水槽代替了真实汽包, 并且给水由给水管均匀的分配在水槽里面, 水槽底部设置两个下降管, 水直接由下降管通过流量计进行排放等方式来模仿汽包运行情况。根据实验研究的要求建立了实验系统, 其中图左半部分为数据采集和显示系统, 右半部分为实验台系统, 其中浪高仪的 3 个传感器分别布置在水槽的左右端以及中心。

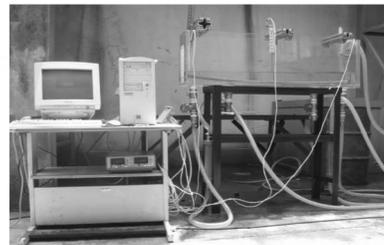


图 2 实验系统的实物

### 2.2 关键测量仪器—浪高仪

本实验研究所使用的是 LGY-3A 三路浪高仪, 并具有高稳定性、高分辨率、调零范围广等优点, 它最大的特点是采用了电容式传感器; 浪高仪主要工

作原理是: 采用电压的大小来反映水位的高度, 它所采用的传感器属钽丝电容式传感器, 实质上是一只线性电容器, 钽丝外附绝缘层为电容介质, 将通过水(水为导体)与介质外层接触传感器的弓架设为电容器负极。钽丝浸水的部分有电容量, 在空气中的部分无电容量, 波浪上下波动时, 浸水部分随水位变化, 从而得到的电容值也发生变化。此变化的电容量输入整机, 并把电容量转变为相应的电压或电流, 即把波浪水位的参数变为电信号输出, 它可以同时检测 3 个点的波浪高度, 传感器的结构如图 3 所示, 传感器实物如图 4 所示。

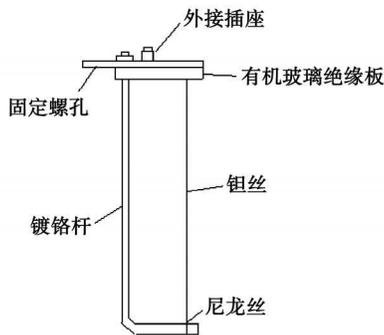


图 3 传感器结构



图 4 传感器实物

### 2.3 汽包水位水动力学模型实验验证步骤

水位晃动实验主要是针对两种典型情况进行的。

(1) 在水位为  $0.16 \text{ m}$  时, 保持给水流量以及下降管流量为  $3.6 \text{ L/s}$  的情况下, 研究水位的波动情况以及水位波形。具体实验步骤是: 在水位为  $0.16 \text{ m}$  时, 将给水管和下降管开关迅速打开到流量为  $3.6 \text{ L/s}$  的位置, 同时, 采用挡板给水一个初始的动量, 让水晃动起来, 并使用浪高仪来测量水槽两端及中间点的水位高度变化;

(2) 在水位分别为  $0.08$ 、 $0.09$ 、 $0.11$ 、 $0.12$  和  $0.135 \text{ m}$  的情况下, 研究水位的波动周期及频率。具

体实验步骤是: 首先用挡板在水槽左端维持左高右低的  $0.1 \text{ m}$  高的水位差, 挡板离水槽左端的距离是  $0.2 \text{ m}$ , 然后在水位稳定的情况下, 迅速将挡板抽开, 让水晃动起来; 然后, 通过高速摄影仪拍摄整个水位晃动的波形, 并采用浪高仪测量水槽两端及中间点的水位高度变化。

## 3 实验数据的整理和模型的实验验证

### 3.1 实验数据的获取与处理

实验数据主要是通过测量仪表和数据采集系统来实现数据的采集与处理, 实验过程中通过高速摄影仪来记录不同时刻下水位波动的波形, 同时通过拍摄的频率及水位波形可以大概的计算水位晃动的周期; 实验通过浪高仪来测量两端以及中间点的水位晃动幅度从而计算水位晃动周期, 并且上述两个仪表采集得到的数据都传输到计算机上, 通过相关的软件处理就可以获取图片以及实验数据。在 (1) 情况下实验可以得到的由高速摄影仪拍摄的图片, 从拍摄的图片可以发现整个水位波动的过程及现象, 由于实验设备以及实验方法的限制, 所以得到的波形还是存在一定的误差, 但是足以反映水位晃动的本质与现象; 图 5 中的实线是在 (2) 情况下通过浪高仪的 3 个传感器采集的实验数据, 从图中明显可以发现, 水槽 3 点的水位晃动的波形, 图 5 中从上到下分别表示左、中、右端的传感器所采集的电压数据。

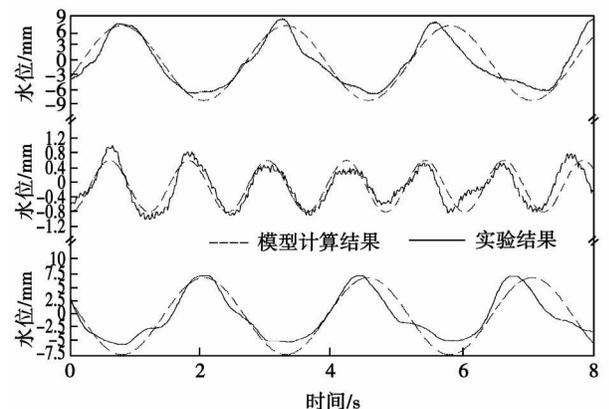


图 5 实验结果与模型计算结果的比较

### 3.2 有进出口流量情况下水动力学模型的实验验证

在水位为  $0.16 \text{ m}$  给水流量和下降管流量为  $3.6 \text{ L/s}$  并且给一个初始激励的情况下, 根据实验装置进行实验研究, 这个实验主要是模拟有进出口

流动时水位的晃荡情况并找出晃荡的水动力特性,得到的水位数据如图 5 中的实线所示;在同样的边界条件下,采用水动力学模型进行计算,得到的结果如图 5 中虚线所示。从图中可以发现:在时域上模型仿真结果与实验结果接近,就波动周期而言两者误差比较小,一般在  $\pm 10\%$  以内;而在波动幅度上,它们之间的误差稍大点,基本上在  $\pm 20\%$  以内,并且相位上也有一定的误差。尽管在幅值和相位上实验结果与计算结果存在一定的误差,但是由于晃荡频率在本研究中起主要作用,而幅值和相位方面的误差并不影响研究的目的,因此认为汽包水位水动力学模型是有效的。

### 3.3 不同水位情况下水动力学模型的实验验证

分别在水位为 0.08、0.09、0.11、0.12 和 0.135 m 的情况下,进行了水位晃荡实验研究,采用高速摄影仪可以拍摄到整个水的晃荡过程,在每秒里拍摄 50 帧图片,即采样周期是 0.02 s。根据一个周期里拍摄了多少帧图片就可以计算出水位晃荡的周期。不同水位情况下得到的晃荡周期如表 1 所示。

表 1 实验结果与解析解及模型计算结果的比较

	水 位/m				
	0.08	0.09	0.11	0.12	0.135
实验研究 /s	3.12	2.97	2.62	2.52	2.32
解析解计算结果 /s	2.96	2.79	2.53	2.43	2.30
模型仿真结果 /s	3.06	2.89	2.58	2.48	2.31

在上述实验条件下,采用液体晃荡固有频率的解析解式<sup>[4]</sup>,对不同水位下的晃荡周期进行计算,得到的结果列入表 1 中;采用前面开发的汽包水位水动力学模型,对不同水位下的晃荡进行仿真计算,得到的晃荡周期也列入表 1 中。

整理表 1 中 3 组数据,可以得到如图 6 所示的曲线,从图中可以知道,模型计算结果和实验结果以及解析解的变化趋势基本上是一致的,并且数值误差不大,根据表 1 的计算结果进行分析,可以发现它们的数值误差在  $\pm 10\%$  以内,因此,水位水动力学模型可以对水动力学性质进行合理的建模与仿真。其误差来源是由于模型中阻力系数处理存在的误差造成的,而实验过程中实验设备以及实验手段是另一误差产生的主要原因。

## 4 结 论

模型与实验对比,结果表明:

(编辑 陈 滨)

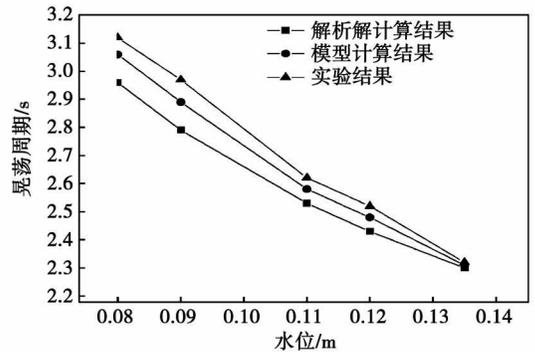


图 6 解析解和实验结果以及模型计算结果的比较

(1) 不同水位情况下水位晃荡周期、实验结果与模型计算结果在趋势上基本上是一致的,数值误差在  $\pm 10\%$  以内;

(2) 有进出口流量情况下,实验结果与模型计算结果在晃荡周期上基本上相吻合,数值误差在  $\pm 10\%$  以内;晃荡幅度和相位之间存在着一定的误差,但是误差基本上在  $\pm 20\%$  以内,基本上可以满足后续研究工作的需要。

### 参考文献:

- [1] 高建强,郝娜.余热锅炉单相受热面动态数学模型及仿真[J].华北电力大学学报,2009,36(3):68-71.
- [2] 崔凝,王兵树.大容量余热锅炉动态建模的研究与应用[J].中国电机工程学报,2006,26(19):103-109.
- [3] DUMONT MARIE NOELIKE GEORGES HEYEN Mathematical modeling and design of an advanced once through heat recovery steam generator[J]. Computer and Chemical Engineering, 2004, 28: 651-660.
- [4] 裘浚隼,杨瑜文,林中达.余热锅炉的动态模型及数字仿真[J].动力工程,2002,22(6):2078-2083.
- [5] KAZUYOSHI IKUNIMOTO ATSUSHI KURITA YASUYUKI TADA et al. Modeling combined cycle power plant for simulation of frequency excursion[J]. IEEE Transaction on Power System, 2003, 18(2): 376-389.
- [6] 王广军,何祖威,陈红.基于神经网络和过程机理的锅炉过热系统动态仿真[J].中国电机工程学报,2001,21(12):38-40.
- [7] BALQIES SADOUN Applied system simulation: a review study[J]. Information Sciences, 2000, 124: 173-192.
- [8] LIU YONG WEN SUMING Dynamic modeling and simulation of humid air turbine cycle//Proceeding of the ASME Turbo Expo 2004 Biomass and Alternative Fuels Innovations Distributed Generation Oil and Gas Applications Q. Vienna: American Society of Mechanical Engineers, 2004, 311-320.
- [9] YANG WEN BEN SUMING Influence of moist combustion gas on performance of a sub-critical turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(5): 821-832.
- [10] 曹小玲.基于水位晃荡的余热锅炉汽包水位动态仿真建模研究[D].上海:上海交通大学,2007.

汽包水位晃荡水动力学模型的实验验证 = Experimental Verification of a Hydrodynamic Model Featuring the Sloshing of a Drum Water Level [刊, 汉] / CAO Xiaoling, LU Kai-xuan (College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076), LU Yongwen, SUMING (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 539 ~ 542

To verify the effectiveness of a hydrodynamic model featuring the sloshing of a drum water level developed was a hydrodynamic mechanism model showing the sloshing of the drum water level and designed and set up was a test rig according to the test requirements. On this basis, an experimental study was performed. The research results show that the test results regarding the sloshing of the drum water level are basically in agreement with the calculated ones in terms of the fluctuation period with the numerical error within a range of  $\pm 10\%$ . In terms of the fluctuation amplitude and phase position, a certain error exists between the test results and calculated ones. However, such an error falls within a range of  $\pm 20\%$ , meeting the demands of the research work and laying a necessary foundation for setting up a complete model featuring the sloshing of the drum water level. Key words: combined cycle heat recovery steam generator; drum water level sloshing; hydrodynamic model; modularization modeling

燃气加热炉燃烧控制方法的研究 = Study of the Methods for Controlling the Combustion in a Fuel Gas Heating Furnace [刊, 汉] / ZUO Weiheng, WANG Yan (National Key Laboratory on Safety and New Technologies for Power Transmission and Distribution Equipment Items and Systems, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 543 ~ 546

Described was the combustion mechanism of a fuel gas heating furnace and analyzed was the conventional dual-crossed limited amplitude control adopted by the combustion and control system of the furnace. In the light of such problems in the practical production and applications as incapable of guaranteeing the optimum air and fuel gas ratio and slow in the response speed of the system during its load change, the authors proposed a variable bias dual-crossed limited amplitude control, of which the value taken as the bias in the dual-crossed limited amplitude model was real time corrected according to the load change and response of the system. The simulation results show that the adoption of the variable control in question during load changes of the system can enhance its response speed, thus guaranteeing the optimum air and fuel gas ratio and concurrently achieving a good cost effectiveness of the system. Key words: fuel gas heating furnace; air/fuel ratio; combustion control; variable bias; dual-crossed limited amplitude

新型干煤粉气流床气化炉的气化特性研究 = Study of the Gasification Characteristics of a New Type Dry Pulverized-coal GFB (Gas Fluidized Bed) Gasifier [刊, 汉] / TANG Zhi-guo (College of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei Institute of Technology, Hefei, China, Post Code: 230009), MA Pei-yong, LI Yong-ling, LIN Qi-zhao (Department of Thermal Science and Energy Source Engineering, China National University of Science and Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power