

喷水塔饱和器的动态建模与仿真

刘永文, 苏 明, 翁史烈

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 讨论了建立喷水塔饱和器的一维动态模型的方法。该方法将饱和器沿高度方向分解为若干段, 每个段用气体和水滴模块表示。通过建立显式仿真模型, 可以得到饱和器在稳定状态下和动态过程中参数的变化规律。根据模型稳定状态的数据, 沿气体的主要流动方向, 压力变化基本呈线性关系, 而其它参数的变化为非线性。模型动态仿真结果表明, 饱和器中气体压力和水之间的相互作用属于快过程, 表现出与换热器不同的特点。

关 键 词: 湿空气透平; 饱和器; 动态仿真

中图分类号: TK123 文献标识码: A

1 引 言

能源需求和环境保护压力的增加, 使燃气轮机得到进一步的重视, 也促使各种更高效率的燃气轮机循环被研究和应用。其中, 燃气轮机排气余热的利用是提高循环效率的主要措施之一。利用余热产生蒸汽, 是燃气—蒸汽联合循环、各种注蒸汽循环的基本工作原理, 其限制条件为利用余热的温度不能低于水的沸点。湿空气透平 (Humid Air Turbine, 简称 HAT) 循环的工作原理是在饱和器中将吸收余热后的水喷入逆流的气体中, 利用水表面与气体中水蒸气的浓度差, 实现水的蒸发, 从而将余热传递给进入燃烧室的气体。由于饱和器中的水可以在比沸点低的温度下蒸发, 使 HAT 循环可以用较简单的装置达到较高的效率^[1]。

对于 HAT 循环的分析, 已有一系列的文献可以参考, 但从系统动力学角度进行的研究还比较少。饱和器是 HAT 循环所特有的部件, 也是在 HAT 循环装置的动态建模和仿真首先要解决的问题。饱和器建模的研究工作目前还集中在稳态特性的建模和分析。在这方面, 瑞典的研究人员结合其先导电站

(Pilot plant) 的建设和试验, 进行较多的研究^[2~3]。国内也开展了相应的研究^[4~5]。文献[6]建立了饱和器的动态模型, 但由于建模方法中存在的缺陷, 使模型存在较大的问题。

本文在对饱和器的工作过程的简化和假设的基础上, 建立饱和器的一维动态数学模型。然后根据模块化建模的思想, 在仿真平台 EASY5 上建立基本仿真模块, 模块组合成为饱和器仿真模型, 给出了一个模型实例及其仿真结果。

2 喷水塔饱和器的数学建模

所研究对象为喷水塔饱和器, 其中水通过喷嘴形成水滴, 从塔顶喷入逆流的气体(湿空气)中, 塔内未放置填料。

在建立数学模型时, 采用了以下简化和假设:

- (1) 气体和水滴的流动为一维层流;
- (2) 气体为可压缩流体, 水滴为不可压缩流体;
- (3) 从喷嘴喷出的水滴为具有相同的直径的球体, 并均匀分布;
- (4) 水滴不与壁面和其它水滴碰撞, 也不碎裂;
- (5) 不考虑气体与壁面的传热和摩擦;
- (6) 气体符合理想气体状态方程。

将饱和器沿高度方向划分为多个段, 每个段作为控制容积分别建立气体和水滴侧的数学模型。

对于气体侧, 根据质量守恒、动量守恒、能量守恒和气体状态方程, 有:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_{in} A_{in} v_{in} - \rho_{out} A_{out} v_{out} + S_m \quad (1)$$

$$\frac{d(\rho K V)}{dt} = \rho_{in} A_{in} v_{in}^2 - \rho_{out} A_{out} v_{out}^2 + (P_{in} -$$

收稿日期: 2003-09-28; 修订日期: 2003-12-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G1999022303); 国家自然科学基金资助项目(59976022)

作者简介: 刘永文(1967-), 男, 四川叙永人, 上海交通大学副教授。

$$P_{out})\left(\frac{A_{in} + A_{out}}{2}\right) + F + S_p \quad (2)$$

$$d(\rho V c_v T + \rho V \frac{v^2}{2} + gz)/dt = (h_{in} + v^2/2 + z_{in})\rho_{in}A_{in}v_{in} - (h_{out} + v_{out}^2/2 + z_{out})\rho_{out}A_{out}v_{out} + S_e \quad (3)$$

$$P = \rho RTP \quad (4)$$

其中： ρ 、 T 、 P 、 v 和 h 分别是气体的密度、温度、压力、速度和焓， V 为气体容积， A_{in} 和 A_{out} 是进口和出口截面积， z 为高度， F 为重力， S_m 、 S_p 和 S_e 分别是气体和水滴相互作用产生的质量、动量和能量流量。

由于水滴分布在气体中，属于不连续介质。为了能够采用与气体侧类似的建立水滴侧的数学模型，引入表观密度：

$$\rho_w = \frac{m_w}{V} \quad (5)$$

其中： m_w 是容积 V 中水滴的总质量。

这样，水滴侧可以建立与式 (1)、(2) 和 (3) 类似的数学模型。根据上述假设条件式 (4)，还可以建立水滴数目的守恒方程。

气体与水滴之间的质量流量来源于水滴表面的蒸发，水的蒸发由浓度梯度推动，其质量传递系数由弗罗斯林公式求得，即：

$$Sh = h_m d_p / D_m = 2 + 0.6Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (6)$$

其中： h_m 为质量传递系数； d_p 为水滴直径； D_m 为空气和水蒸气混合物的二元扩散系数； Re 为雷诺数； Sc 为施密特数。

气体与水滴之间的动量交换主要来源于相对运动产生的阻力，即：

$$S_p = C_d \times \frac{1}{2} \rho_g (v_g - v_p)^2 A_p N \quad (7)$$

其中： C_d 为阻力系数，取决于相对雷诺数； ρ_g 为气体密度； v_g 、 v_p 分别为气体和水滴的运动速度； A_p 为水滴表面积； N 为控制容积内的水滴数目。

气体与水滴之间的能量交换来源于从水滴表面蒸发和水蒸气的能量和对流传热，其中热传递系数从努谢尔特数求出，即：

$$Nu = hd_p / \lambda = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

其中： h 为对流换热系数； λ 为导热系数； Pr 为普朗特数。

3 喷水塔饱和器的仿真建模

为了进行仿真，需要将数学模型转化为可以在计算机上运行的仿真模型。仿真模型应当是可信

的，对用户友好的、灵活的和鲁棒的 (robust)。为了达到这些要求，在仿真平台 EASY5 上建立了饱和器的模块化模型。

根据模块化建模的思想，建立了对应于饱和器分段的仿真模块。为了增强模块的灵活性，每个分段由气体和水滴两个模块表示，两个模块之间只交换质量、动量和能量流量数据，使模块之间的独立性得到保证。对于其它类型 (例如填料塔) 饱和器，可以继续采用空气侧模块，只需要开发水侧的模块。

在饱和器动态仿真工作中，比较突出的是隐式模型所带来的问题。隐式模型是指模型的输入输出之间存在隐函数关系，需要通过迭代计算方法进行求解。作为一个通用仿真平台，EASY5 支持显式模型和隐式模型的求解。由于饱和器的工作过程对压力的变化比较敏感，用隐式饱和器模型仿真动态过程需要相当的时间，而且仿真结果中压力值的误差也非常大^[6]。本文建立的模型为显式模型。

EASY5 用窗口环境提供了用户友好的建模手段。图 1 是利用气体和水滴模块建立的饱和器模型。气体和水滴模块存放在模块库中。用户通过菜单选取需要的模块，通过拖—放操作在模型窗口中建立模块，所有相关的输入或输出都分组定义为端口 (port)，并形成缺省的对号关系。用户只需通过鼠标的点击操作，确定需要连接的模型，所有的输入输出关系自动建立。建立模块及其连接关系后，用户通过对话框输入模块的参数。

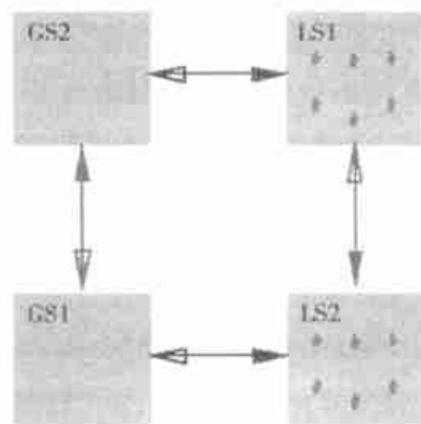


图 1 饱和器中的模块及其连接关系

4 模型实例和仿真结果

参照瑞典先导电站的几何尺寸和运行参数，建立了一个饱和器的仿真模型。塔的高度为 2.5m，直

径为 0.7 m。在模型中, 饱和器沿高度方向均匀分为 5 个段。

在进行动态仿真前, 需要获得饱和器的稳定运行状态。利用动态仿真模型, 只需要输入模型状态变量的估计值, 在外部条件保持不变的情况下可以得到稳定状态。表 1 列出了各段的一些数据, 各段从饱和器的底部开始(沿气体流动方向)编号。

表 1 稳定状态的数据

段	1	2	3	4	5
气体压力/MPa	0.842 57	0.842 49	0.842 40	0.842 32	0.842 24
气体温度/K	368.3	376.5	383.2	388.9	393.9
气体密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7.75	7.43	7.19	6.98	6.78
气体速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.683	0.756	0.812	0.868	0.920
空气质量分数	0.950	0.918	0.891	0.866	0.837
水滴温度/K	370.3	378.9	385.2	390.5	395.8
水滴速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.92	2.82	2.69	2.48	2.09
水滴直径/mm	0.981	0.986	0.990	0.993	0.996
水滴数目($\times 10^6$)	3.06	3.17	3.33	3.60	4.27

分析表 1 可以发现, 气体压力的变化基本呈线性关系, 而其它数据的变化为非线性。沿气体流动方向, 由于气体质量流量增加, 而密度减小, 所以容积流量增加, 气体速度增加。从塔顶部开始, 水滴的温度降低, 而速度增加, 水滴数目减少。

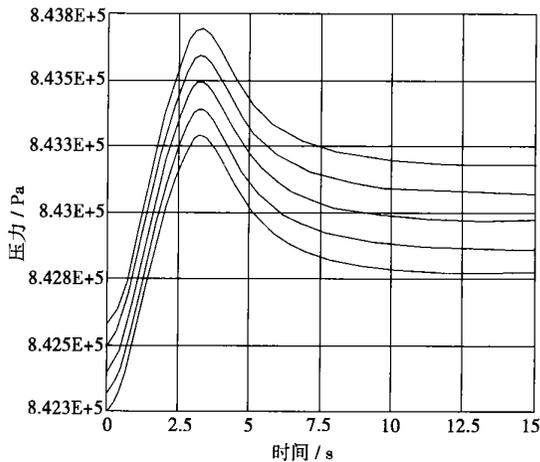


图 2 饱和器压力的动态响应

从稳定状态开始, 对饱和器模型施加各种扰动, 就可以得到饱和器的动态响应。由于篇幅所限, 这里只给出(通过喷嘴进入的)进水量斜坡扰动(0~3 s内进水量增加 50%)作用下, 饱和器内压力的响应曲线(从上到下, 依次为 1~5 段的响应)。可以看到, 由于进水量增加, 各段压力随之上升; 在 3 s 后,

压力略有继续上升, 随后又逐渐回落, 稳定在比零秒时高的压力。这一结果表明饱和器内的压力很快地响应水回路的变化, 而压力变化会引起各个部件工作点的变化。由于饱和器内气体和水直接接触, 使它们之间的相互作用表现出与换热器不同的特点, 属于快过程。饱和器动态特性对系统的影响及其控制将是下一步研究的内容。

以上过程, 采用变步长的 Gear 算法进行仿真, 在 HPC3600 工作站上所需时间约 26 s。

5 结 论

根据模块化建模思想, 讨论了喷水塔饱和器的一维动态建模方法。在通用仿真平台的支持下, 可以根据需要组合模块库中的模块, 方便地建立饱和器的一维动态模型。根据本文的研究, 可以得出以下结论:

(1) 显式模型的建模方法更适合饱和器动态过程的建模和仿真, 通过一个模型实例的动态仿真过程, 证明模型计算速度得到了保证, 说明利用本方法建立的模型能够用于分析饱和器在稳定状态和动态过程中各个参数沿高度方向的变化。

(2) 根据模型实例的稳定状态仿真结果, 沿气体的主要流动方向, 压力变化基本呈线性关系, 其它参数变化呈非线性变化, 而且, 参数的变化趋势是随工作状态点不同而变化的。

(3) 模型的动态仿真结果表明, 由于饱和器内气体和水直接接触, 使相互的动态变化能够很快地响应, 表现出与换热器不同的特点, 属于快过程。

参考文献:

- [1] DAY W H, RAO A D. FT 4000 HAT with natural gas fuel[J]. *Turbomachinery Int.* 1993(Jan/Feb): 22-29.
- [2] LINDQUIST T. Evaluation, experience and potential of gas turbine based cycles with humidification[D]. Sweden: Dr Dissertation, Lund University, 2002.
- [3] DALILI F. Humidification in evaporative power cycles[D]. Sweden: Dr Dissertation, Royal institute of technology, 2003.
- [4] 刘 刚, 王永泓, 杨永刚, 等. 饱和器热力过程数学模型[J]. *船舶工程* 2000(1): 38-40.
- [5] 尚德敏, 王永青, 陈安斌, 等. 湿化器的传热传质机理和性能分析[J]. *热能动力工程*, 2000 15(3): 229-231.
- [6] JOHNSON K. Study of humidification and condensation dynamics in an evaporative gas turbine cycle[D]. Lund: M Sc Thesis, 2002.

Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 281 ~ 284

Radiation energy signals are capable of more directly reflecting the variation of fuel flow rate or combustion quality. An optimization system of radiation energy detection-based intelligent combustion-evolution has been set up to implement the evolution-optimization adjustment of the parameters of a thermodynamic control system. A combustion optimization circuit was designed, which consists of two parts: a fuzzy self-optimizing controller of flue-gas oxygen content and furnace total radiation energy, and an air/coal ratio evolution optimizer. The results of a simulation and the on-site operation results at Kaiyuan Thermal Power Plant have demonstrated the practicality and superiority of the adopted method. **Key words:** furnace radiation energy, evolution optimization

喷水塔饱和器的动态建模与仿真 = **Dynamic Modeling and Simulation of a Water-spray Tower Saturator** [刊, 汉] / LIU Yong-wen, SU Ming, WENG Shi-lie (Education Ministry Key Laboratory for Power Machinery & Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 285 ~ 287

A method of building a one-dimensional dynamic model for a water-spray tower saturator is discussed. Under this method the saturator has been divided along its height into several segments, each being represented by gas and water-drop modules. The setting-up of an explicit simulation model makes it possible to clarify the variation mechanism of parameters of the saturator under a steady state and during a dynamic process. According to the data of the model under a steady state the variation of pressure along the main flow direction of gas basically assumes a linear relationship, while the variation of other parameters has been found to be nonlinear. The results of the model dynamic simulation indicate that the interaction between gas pressure and water in the saturator features a rapid process, thus exhibiting the characteristics different from those of a heat exchanger. **Key words:** humid air turbine, saturator, dynamic simulation

熔融碳酸盐燃料电池动态性能数值模拟 = **Numerical Simulation of the Dynamic Performance of Molten Carbonate Fuel Cells** [刊, 汉] / YU Li-jun, JIANG Xiu-min, YUAN Jun-qi (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), CAO Guang-yi (Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 288 ~ 291

A dynamic three-dimensional mathematical model of fuel cells featuring variable parameters was set up, which can give an accurate description of heat generation, mass transfer and electrochemical reaction characteristics. By using a numerical simulation method it is possible to forecast such performance properties as fuel cell temperature and speed distribution, etc. Through an experimental investigation test data, such as fuel cell power-generation system output performance and temperature distribution, etc can be acquired. The comparative analysis of numerical calculation results with those of experimental tests has confirmed the precision of the numerical simulation, testifying to the relatively high reliability of the adopted mathematical model. **Key words:** fuel cell, computational fluid mechanics, numerical simulation

热力系统新型纵流壳程换热器 CAD 技术的研究 = **Research and Application of CAD Technology for a New Type of Heat Exchanger with a Longitudinal Flow of Shell-side Fluid in a Thermodynamic System** [刊, 汉] / LIU Min-shan, DONG Qi-wu, GU Xin (Thermal Energy Control Center under the Zhengzhou University, Zhengzhou, China, Post Code: 450002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 292 ~ 294

Through the research on some key items of CAD technology, such as parametric graphic design, data configuration and processing, and system integration, etc implemented was the CAD technology integration for a new type of tubular heat exchanger with a longitudinal flow of the shell-side fluid (NTTHELFSF). The CAD technology integration entails fabrication technology, machine components and parts. In addition, resolved were two key issues, namely, information integration and general assembly drawing integration. As a result, it is possible to dramatically enhance the design efficiency and quality of the NTTHELFSF, blazing a new path for the further research and popularization of the latter. **Key words:** the thermodynamic system, new type of tubular heat exchanger with a longitudinal flow of shell-side fluid, parametric graphic