

# 电站锅炉系统仿真模型计算策略的研究

陈立甲, 马广富, 王子才

(哈尔滨工业大学 仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 对复杂系统仿真模型的有效求解涉及到如何组织这些方程并分配以合适的算法问题。本文作者首先将方程的有效组织(本文称之为计算策略)和具体的积分算法概念区分开来, 之后着重探讨了两种现存的面向方程的面向模块的计算策略的应用特点及优缺点, 并提出了组合顺序的计算策略的方案。最后通过电站锅炉系统仿真模型求解实例进一步说明了应用组合顺序计算策略对复杂系统的高精度仿真的优越性。

**关键词:** 计算方法; 面向方程; 面向模块

中图分类号: TM621.2; TP391.9 文献标识码: A

## 1 引言

随着锅炉仿真技术在各个领域的广泛应用, 各种应用目的锅炉数学模型和建模与仿真环境被大量的开发出来。如用于控制目的的模型的线性<sup>[1]</sup>和非线性模型<sup>[2]</sup>; 用于人员培训目的的较为复杂的但精度要求不高的非线性模型<sup>[3]</sup>等等。建模与仿真环境有较早的 MMS 系统等; 较近的 PowerSim<sup>[4]</sup>。建模与仿真环境主要是应普通建模方法建立模型时需要专业水平高、开发周期长等不利因素提出来的。但是不论用哪种方法建模, 当建模完成之后, 都要涉及如何对模型的方程组进行有效求解的问题。目前针对微分方程的具体算法的研究较多, 但对对象锅炉这种复杂的大系统, 它的模型由数量庞大的微分方程和代数方程组成, 如何根据方程的特点有效的组织这些方程、分配以合适的算法, 并有效的解决 Stiff 问题的专门研究较少。鉴于此, 本文作者在这一方面做了一部分工作。首先对复杂大系统的建模方法和在模型的数值求解前对方程的组织方法进行了综述; 其次分析了它们之间的优点与缺点, 最后结合实际电站锅炉系统提出了一种兼具两者优点的组合顺序计算策略。

## 2 模型计算策略

为了阐述方便, 作以下的定义: 类似电站这种复杂的大系统, 它的模型由数量庞大的方程组成, 为了给它们配以合适的算法并精确高效的求解目的, 如何有效组织这些方程, 本文称之为模型的计算策略问题(宏观问题); 而方程组的具体积分方法或迭代方法, 这里称之为模型的计算算法问题(微观问题)。显然在仿真中计算策略先于计算算法, 计算策略确定之后, 才能确定算法。本文着重讨论模型的计算策略问题, 而模型的计算算法由多种方法可用, 如求解微分方程的 Gear 法, 求解非线性方程的 Newton 法等。

大系统的建模方法有两种, 一是将整个系统作为一个建模对象进行建模, 该方法建得的模型包含的方程很多, 所以模型阶次很高, 结果是由一组方程包含所有的部件的动态特性, 称为面向方程的建模方法; 二是将大系统进行模块化分解, 然后分别对每一模块建模, 将这些模块作为模型系统最底层的单位, 组成整个大系统的模型, 这种方法称之为面向模块的建模方法。面向模块化方法的实用性也得益于实际系统一般是由标准的部件组装而成, 标准部件可以使用通用的模型代表。

电站系统的数学模型是具有很强的 Stiff 特性。不管是模块化的方法还是面向方程的方法, 都建成近似稳态(Quasi-Steady State)的模型。其中不重要的快过程, 如炉膛的燃烧、尾部烟道内烟气的流动与传热过程和汽水系统压力通道由于扰动而引起的过渡过程等, 通常建立稳态方程; 而重要的动态过程, 如汽水系统中的焓温通道等, 则建立动态的方程。这样锅炉系统模型就由代数方程和微分方程组成。代数方程的特点是非线性的, 微分方程的时间常数一般互不相同。面向方程的方法建立的模型, 所有的方程集中在一起, 系统具有 Stiff 性; 面向模块的方法由于将整个系统分解成较小的模块, 同一模块或不同模块间不同微分方程的时间常数是不同的, 因此仍然存在 Stiff 问题。

与以上的建模方法相对应, 模型的计算策略可分成三种:

面向方程计算策略 (Equation Oriented Computing Strategy), 所有的方程只用一种积分算法, 只有一个积分步长;

面向模块计算策略 (Modular Oriented Computing Strategy), 不同模块可以拥有自己的算法, 模块间的积分步长可以不同;

面向单个方程的计算策略, 在精度要求不高的地方可以应用, 如在一些用于培训型的仿真器中得到应用, 还有一些在建模仿真中采用<sup>[4]</sup>。

下面以简单的系统为例, 说明它们的特点。对于具有 Stiff 性质的微分方程组, 用相应的数值积分方法必须求解雅可比矩阵<sup>[5]</sup>。对于阶数为  $n$  的常微分方程系统:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t), x(0) = x_0 \quad (1)$$

$$\text{数值积分的雅可比矩阵为 } [M_{ij}] = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

如图 1 为由四个模块组成的简单系统, 图中  $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ 、 $n_d$  分别为模块 A、B、C、D 的微分方程的阶数, 则它们也是四个模块数值计算时雅可比矩阵的阶数。

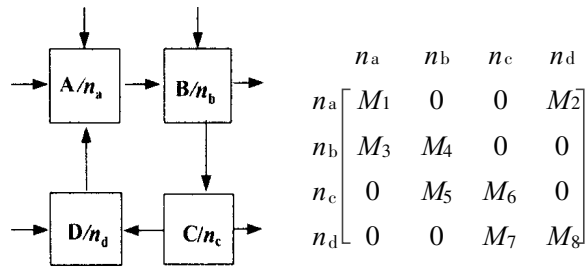


图 1 四模块组成的系统及面向方程计算策略的雅可比矩阵

应用面向方程的策略对上述四模块所组成的系统进行求解时, 所要求解的雅可比矩阵阶数为  $n_a + n_b + n_c + n_d$ , 图 1 中的矩阵即为面向方程计算策略所要求解的雅可比矩阵。应用面向模块的计算策略时需要计算四个阶数较小的雅可比矩阵  $M_1$ 、 $M_4$ 、 $M_6$ 、 $M_8$ , 阶数分别为  $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ 、 $n_d$ 。

对上述四模块系统, 应用面向方程策略和面向模块的计算策略的流程图如图 2 的 (a)、(b) 所示。应用面向方程的方法必须初始化所有方程的数据, 之后在一个时间补偿内同时对方程同时进行求解。

根据以上的分析, 可以看出面向方程和面向模块求解计算策略各有优缺点。

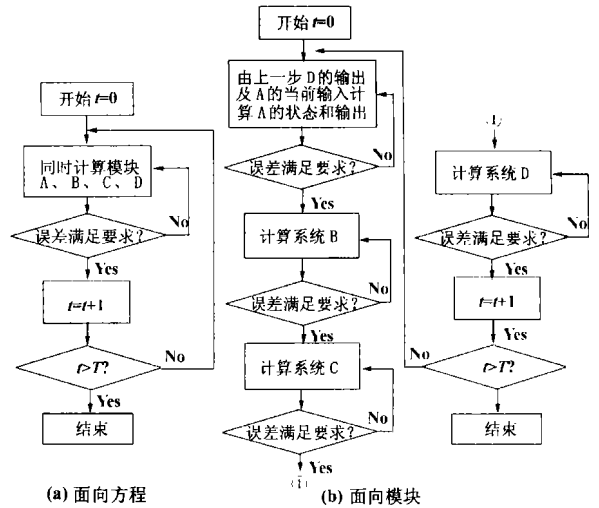


图 2 面向模块与面向方程的计算策略流程图

下优点:

- (1) 每一模块可以拥有自己的算法, 自己的步长, 单独的误差控制;
- (2) 将 Stiff 模块和非 Stiff 模块分开进行计算, 选择适应各自的算法。具有 Stiff 性质的模块使用隐式的积分方法, 其它模块使用显式的积分方法;
- (3) 面向模块的方法可实现并行计算;
- (4) 对复杂的大系统的模型的程序一般比较复杂, 因此模型程序的管理较为复杂, 用面向模块的策略编制的程序也具有模块性质, 因此便于程序的管理;

面向方程的计算策略具有以下的优势:

- (1) 面向方程的方法所有的方程组织在一起, 只有一个算法, 虽然计算量较大, 但计算精度高, 因此许多研究人员开发面向方程的算法;
- (2) 该法可以取较大的积分步长;
- (3) 系统越大矩阵越稀疏, 可使用稀疏矩阵的求解方案, 减小计算量;
- (4) 对于模块间关联较为复杂的系统, 应用面向模块的策略就没有上述优势, 因此象这样的系统最好还是应用面向方程的方法。

### 3 组合顺序计算策略

面向方程和面向对象的计算策略各有优缺点, 如果将两者的优点组合起来, 形成组合顺序计算方案。即将某些模块间的关联比较多, 应用面向模块的方法求解这些模块就显得比较困难, 因此组合起来作为一个计算对象, 就可以达到计算量较小且满足

较高精度的仿真要求。仍以图 1 所示的系统为例, 如果将模块 A、B 组合, 并将 C、D 组合, 同时求解 A、B 之后再同时求解 C、D, 就形成组合顺序计算策略。这种方法需要计算的雅可比矩阵是  $\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ M_3 & M_4 \end{bmatrix}$  和  $\begin{bmatrix} M_6 & 0 \\ M_7 & M_8 \end{bmatrix}$ , 可见阶次介于面向方程的策略与面向模块的策略之间。该方法综合了两种方法的优点: 计算量和计算精度介于两者之间。图 3 给出了其流程图。对于同时具有松散的模块和关联紧密的模块组成的系统, 适于用该法。实际上许多实际系统具有这个特点。

### 4 应用实例

本文仅以电站锅炉本体系统为例进行说明。如图 4 所示为某锅炉系统的示意图, 图中实线表示模块间的汽水参数传递, 虚线表示模块间的烟气参数传递。首先以模块化的建模方法建立各部件的模型。其中锅炉的炉膛燃烧模型由非线性代数方程构成, 其他部件都由微分方程与代数方程组成。

应用面向模块的计算

策略, 可对系统中的每一模块配以合适的具体算法, 并可以分配不同的步长。实际上这样做不一定好, 因为需要协调各模块间的仿真同步, 以便进行模块间的变量交换, 造成了复杂性的增加。

如果应用面向方程的计算策略, 虽然计算精度较高, 并可以取较大的仿真步长, 但需要解决的技术性难题也较多。由于系统的模型比较复杂, 方程初始化数据比较庞大, 而且要求数据精度较高, 这对于锅炉仿真来说是很难作到的。

如果采用组合顺序的策略, 可以先对系统的实际情况加以分析。经分析系统中的水冷壁和锅筒模块由于容积较大, 且工质流动较慢, 过热器和再热器的容积较小, 工质流动较快。因此相对来说水冷壁和锅筒模块为慢过程, 过热器和再热器为快过程。

这样水冷壁和锅筒模块可以取较大的积分步

长, 并可用显式的积分方法, 过热器和再热器取较小的积分步长, 应用隐式的积分方法。如果采用不同的步长, 则需要解决水冷壁和锅筒组合模块与过热器和再热器组合模块之间的传递参数的同步问题。接口信息一般用插值、预测等方法实现。

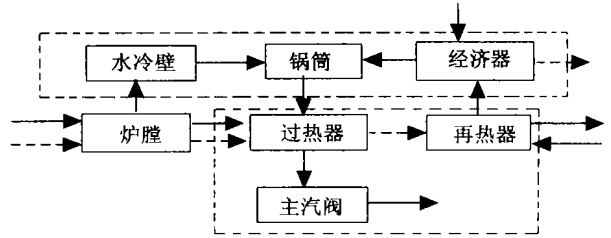


图 4 锅炉系统示意图

在精度要求不高的地方, 如用于培训型的仿真器进行仿真, 可以采用一个积分步长, 在一个时间段内按流体流动的方向顺序计算各个模块。

### 5 结论

对复杂系统的仿真模型的有效求解涉及到如何组织这些方程并分配以合适的算法的问题。本文首先对目前人们对复杂大系统的建模方法和模型的数值求解策略进行了综述, 探讨了两种现存的面向方程和面向模块的计算策略的应用特点及优缺点, 并提出了组合顺序的计算策略的方案。最后以电站锅炉系统为例, 进一步说明了应用组合顺序计算策略对复杂系统的高精度仿真的优越性。

### 参考文献:

- [1] 吕剑虹, 陈建勤, 陈来九. 基于自适应神经元模型的火电单元机组负荷控制系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(1): 1-7.
- [2] WENG CHEN-KUO. Modelling of power plant dynamics and uncertainties for robust control synthesis[J]. Appl Math Modeling, 1996, 20, 500-512.
- [3] DE MELLO, BOILER F P. Models for system dynamic performance studies[J]. IEEE Trans PAS, 1991, 6: 66-74.
- [4] ALBERTO. LEVA. A process simulation environment based on visual programming and dynamic decoupling[J]. Simulation, 1998, 71(3): 183-193.
- [5] 熊光楞. 数字仿真算法与软件[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.

(何静芳 编辑)

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —62~64, 72

With the use of a mathematical model featuring discrete particle movement a preliminary study was conducted of the collision of dust particles in the dust filter of a moving granule bed with filter media particles and its effect on the dust removal efficiency. The variation relationship of the number of times of collision with the system air speed was simulated and calculated. After comparison with the experimental results it has been found that with the change in the system air speed there exists a qualitative agreement between the particle collision frequency and the dust removal efficiency. The study results show that the action of collision between particles plays a major role in influencing the dust removal performance of the moving granule bed. **Key words:** discrete particles, numerical simulation, dust removal by filtration

电站锅炉系统仿真模型计算策略的研究 = **Research on the Calculation Strategy of a Simulation Model for a Utility Boiler System** [刊, 汉] / CHEN Li-jia, MA Guang-fu, WANG Zi-cai (Simulation Center of the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —65~67

The effective solution of a simulation model for a complicated system is related to the problem of how to organize the relevant complex equations of the simulation model and allocate suitable algorithms. First, the authors have identified the difference between the calculation strategy of the equations and the conception of concrete integration algorithms. This is followed by an in-depth exploratory study of two existing kinds of calculation strategy, the module-oriented and the equation-oriented, in respect of its application features as well as its merits and demerits. Also proposed is a scheme of sequential clustered calculation strategy. Finally, through a specific example of the solution for a utility boiler simulation model the superiority of the sequential clustered calculation strategy has been further demonstrated as regards its ability to attain a high-precision simulation for complicated systems. **Key words:** calculation method, equation-oriented approach, module-oriented approach

单燃烧器火焰数字图像处理与诊断方法研究 = **A Study of the Digital Image Processing and Diagnosis Method for a Single Burner Flame** [刊, 汉] / HUA Yan-ping, YU Xiang-jun, LU Zen-zhong, et al (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —68~72

On the basis of pulverized-coal combustion theory and digital image processing technology proposed is a method for the diagnosis of the on/off status of a burner flame. The method features three conditions, namely, the presence of a projection flame front, the irregular shifting motion of the latter's location, the variation of the latter's average gradient value. With the help of the above method it is possible to guide combustion operations and help FSSS (furnace safeguard supervisory system) to ensure furnace safety protection. **Key words:** furnace safety protection, furnace flame detection, digital image processing, flame front

传感器故障检测的 Powell 神经网络方法 = **Sensor Failure Detection Based on a Powell Neural Network Method** [刊, 汉] / LI ming, XU Xiang-dong (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —73~75

It is essential for the control system of a large-sized thermodynamic system to detect sensor failures and then take pertinent measures to ensure the successful implementation of the control process. The authors have come up with a new type of failure detection method based on Powell neural network. Under this method a neural network observer is set up for each sensor of the thermodynamic system, which at first received an off-line training. On this basis, failure detection and on-