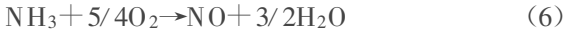


这些反应和流化床中的焦炭含量、床中 CO 和 H₂O 的浓度有关。H₂ 对于 NO 的还原反应比 CO 对于 NO 的还原反应重要性要小得多。气相中 NH₃ 对于 NO 的反应几乎对 NO 还原没有影响,这是由于流化床中的气固反应特别快, NH₃ 在床内的浓度特别小的缘故⁷⁾。

下面两个反应对于 NH₃ 氧化非常关键:



这两个氧化反应中生成 NO 的反应要比生成

N₂ 的反应重要,而气相中 NH₃ 与 O₂ 的反应几乎对 NO 的生成没有影响。

5 小结

通过数值计算表明,高水分煤在流化床中燃烧时,煤中的水分、床内的 CO 浓度和空-燃比等都对于 NO 转换率有较大影响。随着床内水分的增加,由于水煤气反应,使得 CO 的浓度增加。当煤中水分由 1.6% 增加至 25% 时,计算的 NO 转换率
(下转 211 页)

火电厂仿真动态数学模型计算方法研究

(北京理工大学机电工程学院) 老大中
(清华大学热能工程系) 杨策 蒋滋康

[摘要] 研究了火电厂仿真中具有代表性的惯性环节动态数学模型的计算方法。对数值解的稳定性进行了研究。通过理论分析和数学推导,找出影响计算精度的动态因子,从而获得能够充分逼近解析解的方法。给出了隐式欧拉方法和梯形方法使用条件的判定准则。对梯形方法的振荡现象进行了研究,得到了相应的判据。

关键词 火电厂 仿真 数学模型 计算方法 动态因子
中图分类号 TK 20241

1 引言

在火电厂仿真培训器软件研制时,至少要满足两点要求,一是要保证仿真过程的实时性,即要求仿真动态过程与火电厂热力设备的实际过程相一致,二是仿真数学模型所描述的物理现象在计算过程中是稳定的,并要达到一定的精度。火电厂仿真的许多动态数学模型可归结成下面基本形式的微分方程

$$A \frac{dX}{dt} = \sum B_i (X_i - X) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

这种方程的例子如换热器金属蓄热方程^[1]

$$M_m C_p \frac{dT_m}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

管内、外介质通过壁面的传热量为

$$Q_1 = \alpha_1 S_1 (T_1 - T_m) \quad (3)$$

$$Q_2 = \alpha_2 S_2 (T_m - T_2) \quad (4)$$

将方程(3)、(4)代入(2),得

$$M_m C_p \frac{dT_m}{dt} = \alpha_1 S_1 (T_1 - T_m) \quad (5)$$

$$+ \alpha_2 S_2 (T_2 - T_m)$$

结果和方程(1)的形式相同。

2 方程分析与数值算法

对于方程(1),一般情况下系数 A 和 B_i 是变量 X 的函数, X_i 也随时间而变。然而,在 X 变化的一定范围内, A 和 B_i 随 X 的变化不大,经线性化处理

后,即近似认为 A 和 B_i 是常数,则方程(1)存在解析解,其表达式为

$$X = \frac{\sum B_i X_i - (\sum B_i (X_i - X')) e^{-\frac{\Delta t}{T_c}}}{\sum B_i} \quad (6)$$

$$= \frac{\sum B_i X_i - (\sum B_i (X_i - X')) e^{-T_D}}{\sum B_i}$$

式中, X 为 $t + \Delta t$ 时刻的值, X' 为 t 时刻的值。方程(6)描述的是惯性环节^[2],其特点是:当输入量 X_i 有一阶跃变化时,输出量 X 在开始时变化较快,以后逐渐减慢,最后趋于一个稳态值。

在式(6)中

$$T_c = \frac{A}{\sum B_i} \quad (7)$$

是时间常数。而式(6)中的 T_D

$$T_D = \frac{\Delta t \sum B_i}{A} = \frac{\Delta t}{T_c} \quad (8)$$

是无量纲时间。对于给定的仿真对象,它是已知值。

T_D 在本文研究中将起着重要作用。

分析方程(6)可知,当 $T_D \rightarrow \infty$ 时,

$$X = \frac{\sum B_i X_i}{\sum B_i} \quad (9)$$

趋于一常数。

用表达式(6)算出的值虽然准确,但式中含有 e 指数的形式,占用机时较多,在仿真计算中几乎不采用解析算法。一般在仿真计算中直接从方程(1)出发,构造不同的差分格式,用一定精度的近似解来代替解析解,以满足实时仿真的要求。对这种类型方程的解可考虑下列几种常用方法:显式欧拉方法;隐式欧拉方法;梯形方法。

所谓显式欧拉方法,就是在求解方程(1) $t + \Delta t$ 时刻的值 X 时,方程右边的 X 用 t 时刻的已知值来代入。所谓隐式欧拉方法,就是在求解 $t + \Delta t$ 时刻的值 X 时,方程(1)右边的 X 取 $t + \Delta t$ 时刻未知值 X 。将显式欧拉方法和隐式欧拉方法进行算术平

均,就得到梯形积分公式。现在引入一个参数 D_F ,并对梯形方法 D_F 的引入把数值解与解析解联系起来,这反映出数值解与解析解之间存在着内在的关系。可以根据方程(18)所确定的关系用曲线拟合的方法求出 D_F 随 T_D 变化的关系式,再用统一差分方程(10)逼近解析方程(6),可以期望得到比隐式欧拉方法和梯形方法更好的计算结果。按此方法得到的精度取决于 D_F 的拟合曲线对 T_D 的逼近程度,原则上可以达到任意精确,但在实用上只用二次或三次多项式来拟合对仿真来说就足够了,并且拟合曲线可事先作出,实际计算时只需知道 T_D 的值即可。

采用不同的计算形式,可得到不同的动态因子表达式。例如,将方程(18)代入方程(10)或直接对方程(10)变形,得

$$X = X' + \frac{\Delta t(\sum B_i(X_i - X'))D_2}{A} \tag{19}$$

$$= X' + \frac{\sum B_i(X_i - X')D_3}{\sum B_i}$$

其中

$$D_2 = \frac{1 - e^{-T_D}}{T_D} \tag{20}$$

可称为第二动态因子。当 T_D 趋于无穷大时,其极限是 0,而当 T_D 趋于 0 时,其极限是 1。而

$$D_3 = 1 - e^{-T_D} \tag{21}$$

可称为第三动态因子,其上、下限也是 1 和 0。

在 T_D 相同的区间,二次多项式拟合结果表明,第一动态因子拟合效果最好,第二动态因子拟合效果次之,第三动态因子拟合效果又次之,并且第二动态因子的拟合效果和 e 指数直接拟合效果一样,因为后两条曲线是以 $e^{-T_D}=0.5$ 为对称轴的。

3 数值算法的两个判定准则

现在来研究隐式欧拉方法和梯形方法的配合使用问题,即在什么条件下使用不同的算法才能使计算误差小。正如上面指出的那样,隐式欧拉方法和梯形方法首次计算的误差符号相反,故必存在这两种算法之和等于二倍的解析解这一情况,即存在下列关系式

$$2X + \frac{\sum B_i(X_i - X')}{A/\Delta t + \sum B_i} + \frac{\sum B_i(X_i - X')}{A/\Delta t + 0.5\sum B_i} \tag{22}$$

$$= 2 \frac{\sum B_i X_i - (\sum B_i(X_i - X'))e^{-T_D}}{\sum B_i}$$

采用同前面类似的方法,方程(22)可化为

$$2(1 - e^{-T_D}) - \frac{T_D(3T_D + 4)}{(T_D + 1)(T_D + 2)} = 0 \tag{23}$$

该方程有两个解,一个解是 0,另一个解是

$$T_D = 2.589754 \dots \tag{24}$$

由此得到一个判定准则:当 T_D 小于 2.589754 时,梯形方法的第一步计算误差必然小于隐式欧拉方法的第一步计算误差。将式(24)代入式(18),则可求出此时 D_F 约等于 0.694989。由此判定准则可知,具有二阶精度的梯形方法只有在一定的条件下,它的计算误差才比仅具有一阶精度的隐式欧拉方法的计算误差小。

我们再对梯形算法的振荡问题作以研究。令方程(10)中的 D_F 等于 0.5,当 T_D 较大时,分母中的 1 可忽略不计,则方程(10)变为

$$X = X' + \frac{\sum B_i(X_i - X')}{0.5\sum B_i}$$

$$= \frac{\sum B_i X_i}{\sum B_i} + (\frac{\sum B_i X_i}{\sum B_i} - X')$$

从方程(25)可以看出,当 X' 小于稳态值时, X 大于稳态值,反之, X 则小于稳态值。由于计算是不断进行的,某一时刻的 X 就是下一时刻的 X' , X 在稳态值附近上下波动,误差交替变号,即解产生振荡。同理,可以证明,在 $0.5 < D_F < 1$ 的稳态解范围内,如果 D_F 不是按式(18)计算而是任取的话,解也会出现振荡。下面研究振荡不发生的条件。

先考虑初值 X' 小于稳态值的情况,假设动态过程中时间常数和无量纲时间不变。因 X' 小于稳态值时,第一步计算结果的误差是正值,故只有以后每一步误差均小于 0 时才不会振荡,根据数学归纳法,假设第 N 步计算误差是正值,则第 $N-1$ 步的计算也得是正值,由此前推到第二步计算误差是正值即可,于是有下列不等式

$$X_1 = X' + \frac{\sum B_i(X_i - X')}{A/\Delta t + 0.5\sum B_i} \tag{26}$$

$$\geq \frac{\sum B_i X_i - (\sum B_i(X_i - X'))e^{-T_D}}{\sum B_i}$$

及

$$X_2 = X_1 + \frac{\sum B_i(X_i - X_1)}{A/\Delta t + 0.5\sum B_i} \tag{27}$$

$$\geq \frac{\sum B_i X_i - (\sum B_i(X_i - X_1))e^{-2T_D}}{\sum B_i}$$

算;对结构 9 进行弹性支承边界条件的模态计算。组合结构模态计算有两种情况:

第一种情况(见图 2):燃机、燃机底架和工艺基

架(前底架、后底架、主机架、排气管支架)模态计算。第二种情况(见图 3):整个结构模态计算。

4.2 不平衡响应计算

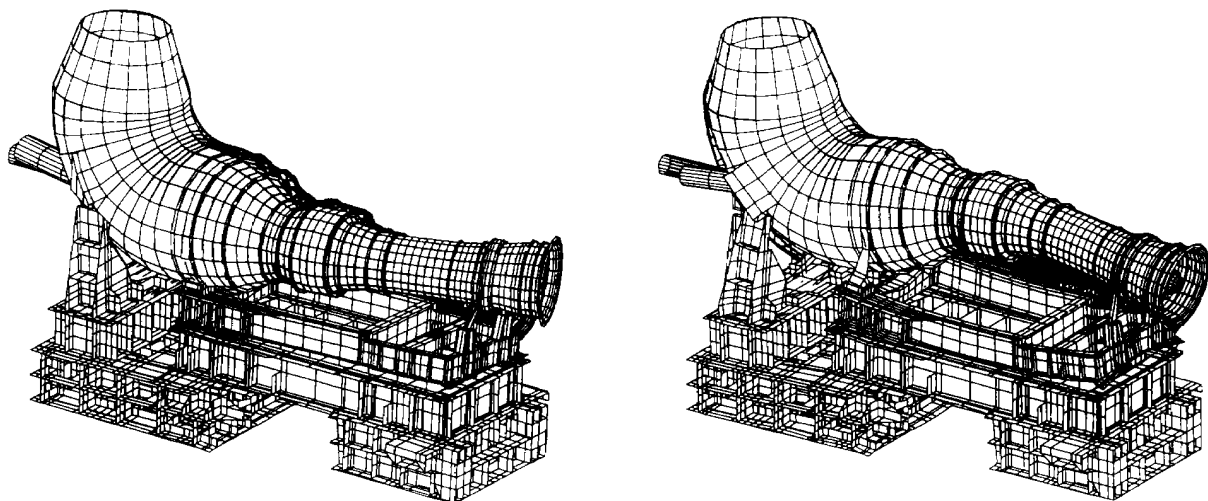


图 4 燃机系统典型模态形状

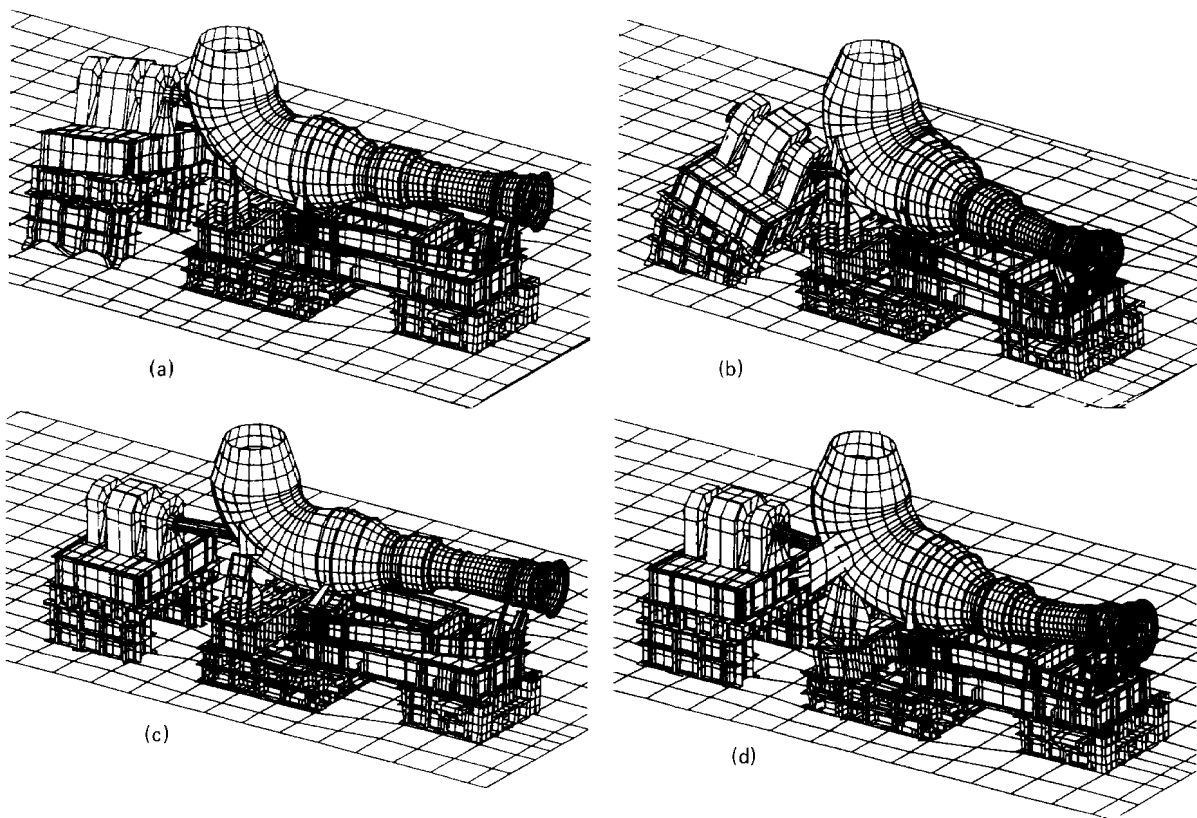


图 5 燃机、测功器、基础平台系统典型模态形状

燃机转子和测功器转子的不平衡力以动载荷形式计入,施加在转子上。减振器的阻尼取为 0.1,在模拟减振器的弹簧元中计入。

5 计算结果与分析

5.1 模态计算结果

第一种组合情况(燃机系统)的前 10 阶固有频

炉

微机控制系统,具有以下功能有:

3.1.1 数据采集、处理及显示 装置设有 12 寸绿色 CRT 显示,可对锅筒水位、蒸汽压力炉膛负压、炉内各点温度、煤量、汽量、水量、风量、送风风压等实行模拟流程图显示。改进后,采取了对模拟信号的限幅措施,从而避免了信号超量程造成的数据紊乱现象。

3.1.2 控制系统 具有独立的给水调节系统和给煤、燃烧自动调节系统。微机能完成对给水、给煤、送风与引风的自动控制,使锅筒水位、蒸汽压力、炉膛负压、风煤配比系数、烟气含氧量等运行参数,维持在规定范围,使锅炉处于安全、经济、稳定运行状态,解决了给煤速度信号与微机控制的匹配问题,能适应我厂生产用汽量变化大的实际情况,满足了生产要求。

3.1.3 报警 该系统可对水位、蒸汽压力、炉膛温度、炉膛负压等参数实现上下限越限报警。当运行参数越限时,声光自动报警。上下限位由操作人员在线设定、修改。

3.1.4 报表打印 本机配有 80 字符/行的通用并行打印机,可打印出十几种参数的数据,形成日用汽、水、煤统计报表,并开发出随机打印运行总图、光柱显示图、给定测量值显示图等多项功能。

3.1.5 累计积算 对汽量、水量、煤量等进行累计积算,并可对产汽量进行压力校正计算。

3.1.6 手操/自动双向无扰动切换 备有后备操作装置,能实现直接人工强电操作,提高了微机在生产中的适用性。

3.1.7 参数在线修改 在自动工作状态下,对各给定值、PID 整定参数、配比系数、实时时钟等实现在线修改,并可在 CRT 画面上显示。

3.1.8 备有 RS232 全双工串行接口,可实现计算机联网与管理。

3.2 系统硬件

本系统以 Z180MPU 为核心,主机箱内配有 9104ACPU 板,9210 高分辨率显示板,0811 光隔离 A/D 板,1234 光隔离热电阻 A/D 板,4302,4306 光隔离开关量 I/O 板,11060 光隔离 D/A 板,各模板通过 STD 总线与 CPU 相连,构成完整的工控主机,系统组成见图 1。

3.3 系统控制原理

工业锅炉本身是一个动态特性比较复杂的对象,其具有多输入、多输出,参数间相互耦合等特性。

本系统对锅炉自动控制基本上可分为上锅筒水位控