

SK15HE 燃气轮机实时仿真器的 动态数学模型与仿真

吕泽华 赵士杭 徐福生
(清华大学)

[摘要] 本文以 SK15HE 三轴燃气轮机为例, 建立了三轴燃气轮机实时仿真的动态数学模型, 并根据机组控制系统的特点, 提出了利用实时仿真器对燃气轮机控制系统进行检测的方法。用这种方法很好地解决了仿真精度和仿真时间之间的矛盾, 取得了满意的结果。

关键词 燃气轮机 数学模型 实时仿真

分类号 TK47 TP15

1 引言

燃气轮机控制装置设计的目的是控制燃气轮机的工作。控制装置接受来自燃气轮机速度传感器、温度传感器、压力传感器传来的信号, 以便控制供给燃气轮机的燃料流量。控制装置是否正常工作, 直接影响到燃气轮机

的输出功率、安全运行和使用寿命。当控制装置发生故障时, 就需对它进行维修及对它的各个整定值进行调整。维修和调整, 在没有确认控制装置是否正常工作前就用它来控制机组的运行是非常危险的。用于检测控制装置的实时仿真器就可以保证控制装置的可靠性和机组的安全运行。

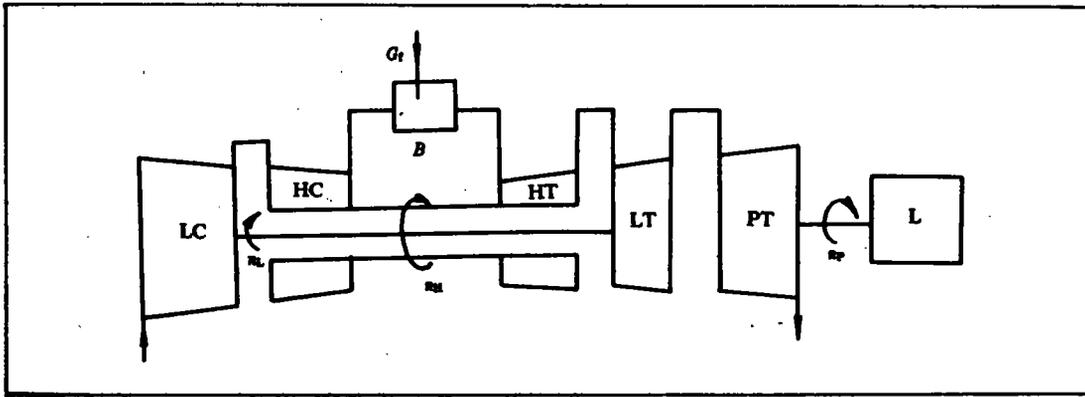


图1 SK15HE 三轴燃气轮机

收稿日期 1993 06 15

本文联系人 吕泽华 男 48 副教授 100080 北京市

本文以 SK15HE 三轴燃气轮机(见图 1) 为例,建立了机组的动态数学模型来模拟三轴燃气轮机的各种动态过程,用实际控制系统来控制该数学模型,两者之间通过计算机软硬件进行连接,这样就构成了闭环仿真系统。

由于所建立的动态模型是用于实时仿真,而燃气轮机动态过程非常短暂,因此既要求在一个采样周期内必须完成一次迭代计算,给出控制参数的数值,又要求动态模型非常准确,而同时做到以上两点是十分困难的。本文没有将不平衡工况的计算做为子程序来处理,而是单独进行不平衡工况的计算,将计算结果建立成动态计算所需的数组数据文件,动态计算用到的系数只需由数组作插值计算即可求取。同时,又可以把许多因素如:高、低压压气机放气、各种损失等放到不平衡工况计算中去考虑,使非平衡工况计算尽量准确。这样,既能够保证动态计算的速度,又

保证了仿真的精度。

2 实时仿真器模型

实时仿真检测的目的是为了检验各种动态过程中控制器是否能正常工作,而判断控制器是否正常工作主要是看它是否能提供合理的燃料量。供给燃气轮机的燃料量由燃料阀控制,燃料阀在机械上与电动液压作动器相连接,作动器以液压为动力,接受从控制器来的旋转轴位置信号,燃料阀提供与旋转轴位置成比例的燃料量。电控装置监测燃气轮机的参数,例如转速、温度和压力,并将这些信号与基准给定值比较,再提供燃料气体流量,以达到或保持合适的燃气轮机状态。针对 SK15HE 三轴燃气轮机燃料控制装置的功能及特点,提出了实时仿真检测模拟器的原理图(见图 2)。

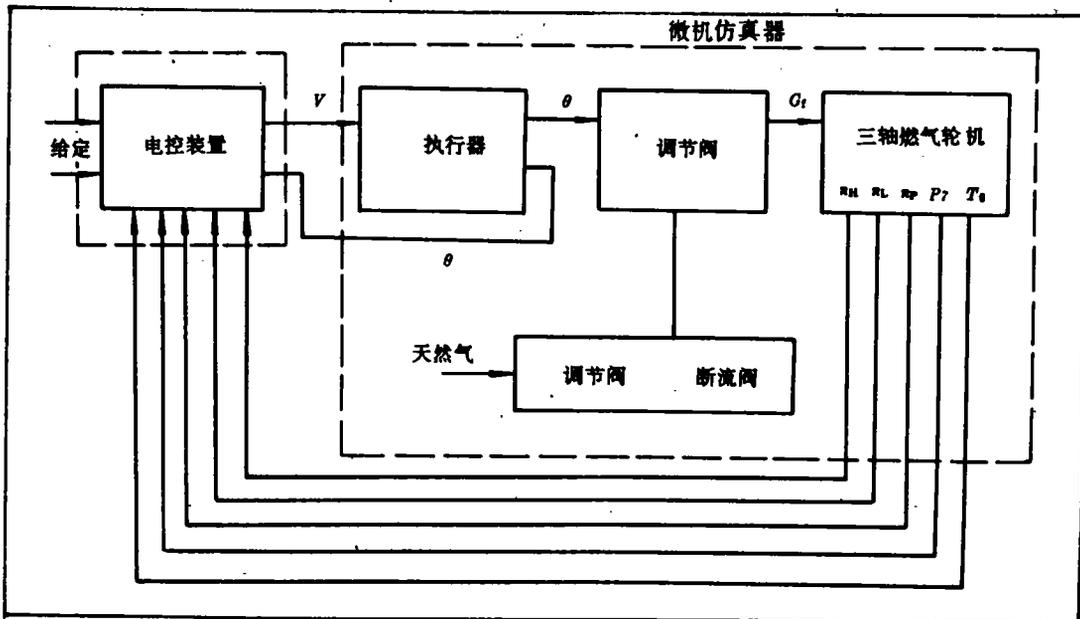


图 2 实时仿真检测模拟器原理图

实时仿真检测器主要由仿真三轴燃气轮机静、动态模型的微型计算机和带有SK15HE 机组电控装置的控制柜组成。控制柜中包括电控装置及各种选择开关,并配有与计算机连接的输入输出信号接线端子,规定为4~20 mA 电流信号。微机仿真器与控制柜通过A/D、D/A 和I/O 接口进行通讯。

3 三轴燃气轮机动态模型及算法

3.1 动态物理模型的简化

转子连同由它所传动负载的所有转动惯量是燃气轮机动态过程中最重要的蓄能部件。固体部件的不稳定换热和气体非稳态过程也是影响燃气轮机动态特性的两种蓄能器,但在建立动态模型的过程中,忽略了后两种蓄能器对动态特性的影响,这是出于以下三点的考虑:

3.1.1 燃气轮机中气流密度一般不大,SK15HE 又是轻型燃气轮机,管道容积很小,容积蓄能器作用对机组动态过程影响很小。

3.1.2 SK15HE 机组部件表面积比较小,同时机组加载和减载过程缓慢,所以不稳定换热影响相对来说也很小。

3.1.3 固体部件不稳定换热,气体非稳态过程的数学模型都是非线性的,而且阶次较高,线性化后的模型阶次也较高,而且动态环节惯性差别大。这样一方面会造成很大的计算误差,另一方面计算量也大大增加,不适于实时仿真的需要。

基于以上三点原因,在计算三轴燃气轮机动态特性过程中,仅考虑了三个转子的转动惯量。这样会使计算结果有一些误差,由计算结果看,加、减载过程误差很小,甩负荷过程误差会大一些,最后要根据实验结果对动

态模型进行修正。

3.2 不平衡工况数组的计算

对于三轴燃气轮机的平衡工况,在给定所带动负载的规律后,燃气轮机只有一个自由度。而对于三轴燃气轮机的不平衡工况,有高压、低压、动力透平三个转子,调节量为燃料量,共有四个自由度。四个独立变量就能决定系统的不平衡状态,这四个变量一旦确定,系统的所有参数,包括三个转子的剩余扭矩,气道参数等将被唯一确定下来。依据仿真计算的需要,取三个转子的转速 n_H 、 n_L 、 n_P 和燃料量 G_f 做为独立变量进行编程,计算结果根据动态计算的需要建立如下五个数据的数组文件:高压轴剩余扭矩 $M_H(n_H, n_L, n_P, G_f)$;低压轴剩余扭矩 $M_L(n_H, n_L, n_P, G_f)$;动力透平剩余扭矩 $M_P(n_H, n_L, n_P, G_f)$;动力透平进气温度 $T_6(n_H, n_L, n_P, G_f)$;高压压气机7级后压力 $P_7(n_H, n_L, n_P, G_f)$ 。

不平衡工况的计算程序总框图见图3。程序初始化主要包括变量定义、变量传送和变量初始化,读入平衡运行线和部件特征。对于甩负荷及快减载,低压压气机3级后放气,此时机组的不平衡工况特性与正常加、减载工况不同。要进行全面的仿真计算,就要计算低压压气机放气和不放气两种情况下的不平衡工况数表,这两个数表的计算区域有很大差别,两种情况下计算区域的选择及其离散化也在程序初始化模块中完成。用残量法求解残量方程组获取不平衡工况特性参数的程序框图见图4。计算判断语句用于决定程序计算的过程并按要求决定计算域和计算点。一维插值方法用以寻求那些用正常算法未能计算出的工况点上的参数值,用以完整不平衡工况数组。最后将计算结果按燃料量 G_f 整理,建立以燃料量和三个转子转速为独立变量的四维数组,供动态计算使用。

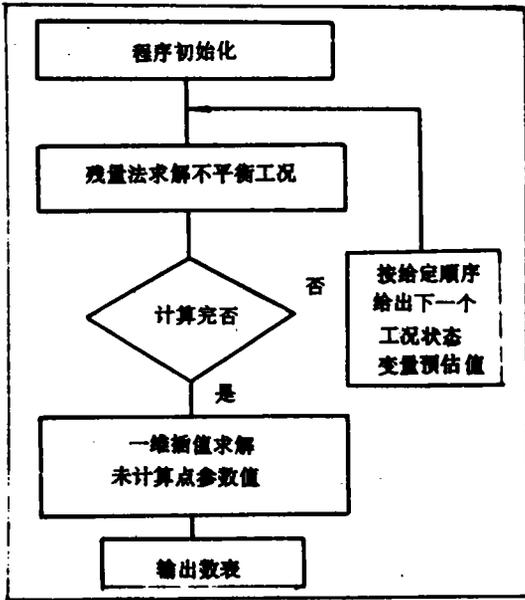


图3 不平衡工况计算框图

$$\left. \begin{aligned}
 1n_1 &= 1n_0 + \frac{h}{6}(1K_1 + 2 \cdot 1K_2 \\
 &\quad + 2 \cdot 1K_3 + 1K_4) \\
 1K_1 &= C \cdot 1M_0(t_0, 1n_0) \\
 1K_2 &= C \cdot 1M'_{\frac{1}{2}}(t_0 + \frac{h}{2}, 1n_{\frac{1}{2}}) \\
 1K_3 &= C \cdot 1M'_{\frac{1}{2}}(t_0 + \frac{h}{2}, 1n'_{\frac{1}{2}}) \\
 1K_4 &= C \cdot 1M_1(t_0 + h, 1\bar{n}_1)
 \end{aligned} \right\} (3)$$

3.3 动态微分方程的求解

对于三个转子的微分方程

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dn_H}{dt} &= C_H \cdot M_H(n_H, n_L, n_p, G_f) \\
 \frac{dn_L}{dt} &= C_L \cdot M_L(n_H, n_L, n_p, G_f) \\
 \frac{dn_p}{dt} &= C_p \cdot M_p(n_H, n_L, n_p, G_f)
 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: $C_H = 60/2\pi J_H$; $C_L = 60/2\pi J_L$
 $C_p = 60/2\pi J_p$

J_H, J_L, J_p 分别为高压转子、低压转子和动力透平的转动惯量。

对于式(1), 将燃料量 G_f 做为一个输入量, 选用四阶龙格库塔法计算, h 为积分步长:

$$\left. \begin{aligned}
 Y_1 &= Y_0 + \frac{h}{6} \cdot (K_1 + 2K_2 \\
 &\quad + 2K_3 + K_4) \\
 K_1 &= f(t_0, Y_0) \\
 K_2 &= f(t_0 + \frac{h}{2}, Y_0 + \frac{h}{2} \cdot K_1) \\
 K_3 &= f(t_0 + \frac{h}{2}, Y_0 + \frac{h}{2} \cdot K_2) \\
 K_4 &= f(t_0 + h, Y_0 + h \cdot K_3)
 \end{aligned} \right\} (2)$$

将式(2)代入式(1)并以列向量形式表示

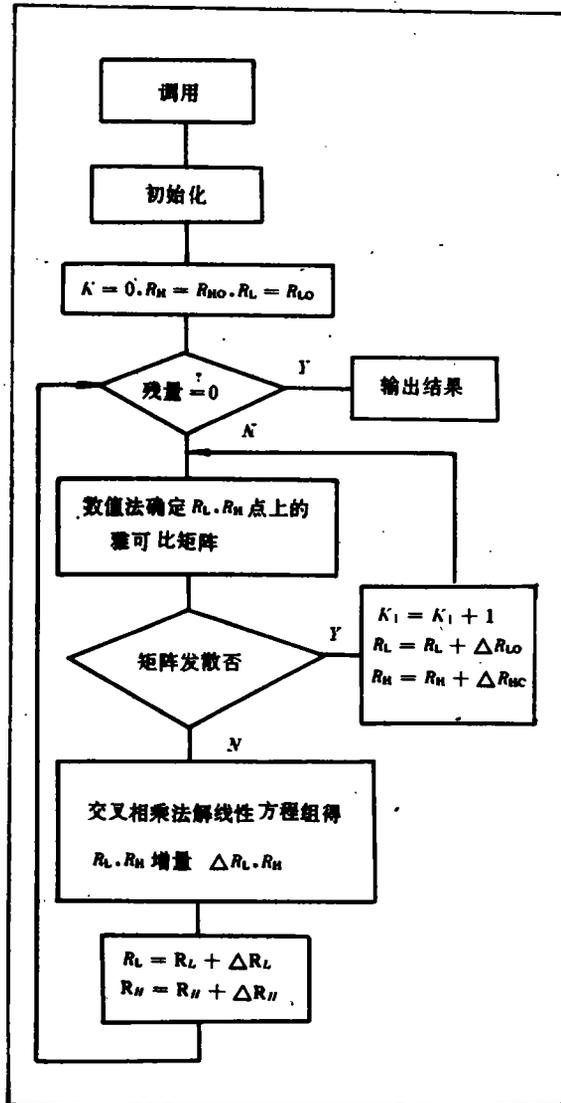


图4 用残量法求解不平衡工况程序框图

式中:

$$1n_0 = \begin{bmatrix} n_{H0} \\ n_{L0} \\ n_{P0} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_H, 0, 0 \\ 0, C_L, 0 \\ 0, 0, C_P \end{bmatrix}$$

$$1n_1 = \begin{bmatrix} n_{H1} \\ n_{L1} \\ n_{P1} \end{bmatrix}$$

$$1M_0 = \begin{bmatrix} M_{H0}(n_{H0}, n_{L0}, n_{P0}, G_{r0}) \\ M_{L0}(n_{H0}, n_{L0}, n_{P0}, G_{r0}) \\ M_{P0}(n_{H0}, n_{L0}, n_{P0}, G_{r0}) \end{bmatrix}$$

$$1n_{\frac{1}{2}} = 1n_0 + \frac{h}{2} \cdot C \cdot 1M_0$$

$$1n_{\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} n_{H0} + \frac{h}{2} C_H \cdot M_{H0} \\ n_{L0} + \frac{h}{2} C_L \cdot M_{L0} \\ n_{P0} + \frac{h}{2} C_P \cdot M_{P0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{H\frac{1}{2}} \\ n_{L\frac{1}{2}} \\ n_{P\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

$$1M_{\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} M_{H\frac{1}{2}}(n_{H\frac{1}{2}}, n_{L\frac{1}{2}}, n_{P\frac{1}{2}}, G_{r\frac{1}{2}}) \\ M_{L\frac{1}{2}}(n_{H\frac{1}{2}}, n_{L\frac{1}{2}}, n_{P\frac{1}{2}}, G_{r\frac{1}{2}}) \\ M_{P\frac{1}{2}}(n_{H\frac{1}{2}}, n_{L\frac{1}{2}}, n_{P\frac{1}{2}}, G_{r\frac{1}{2}}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$1n'_{\frac{1}{2}} = 1n_0 + \frac{h}{2} \cdot C \cdot 1M_{\frac{1}{2}}$$

$$1n'_{\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} n_{H0} + \frac{h}{2} \cdot C_H \cdot M_{H\frac{1}{2}} \\ n_{L0} + \frac{h}{2} \cdot C_L \cdot M_{L\frac{1}{2}} \\ n_{P0} + \frac{h}{2} \cdot C_P \cdot M_{P\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n'_{H\frac{1}{2}} \\ n'_{L\frac{1}{2}} \\ n'_{P\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

$$1M'_{\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} M'_{H\frac{1}{2}}(n'_{H\frac{1}{2}}, n'_{L\frac{1}{2}}, n'_{P\frac{1}{2}}, G_{r\frac{1}{2}}) \\ M'_{L\frac{1}{2}}(n'_{H\frac{1}{2}}, n'_{L\frac{1}{2}}, n'_{P\frac{1}{2}}, G_{r\frac{1}{2}}) \\ M'_{P\frac{1}{2}}(n'_{H\frac{1}{2}}, n'_{L\frac{1}{2}}, n'_{P\frac{1}{2}}, G_{r\frac{1}{2}}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$1\bar{n}_0 = 1n_0 + h \cdot C \cdot 1M'_{\frac{1}{2}}$$

$$1\bar{n}_1 = \begin{bmatrix} n_{H0} + h \cdot C_H \cdot M'_{H\frac{1}{2}} \\ n_{L0} + h \cdot C_L \cdot M'_{L\frac{1}{2}} \\ n_{P0} + h \cdot C_P \cdot M'_{P\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n}_{H1} \\ \bar{n}_{L1} \\ \bar{n}_{P1} \end{bmatrix}$$

$$1\bar{M}_1 = \begin{bmatrix} M_{H1}(\bar{n}_{H1}, \bar{n}_{L1}, \bar{n}_{P1}, G_{r1}) \\ M_{L1}(\bar{n}_{H1}, \bar{n}_{L1}, \bar{n}_{P1}, G_{r1}) \\ M_{P1}(\bar{n}_{H1}, \bar{n}_{L1}, \bar{n}_{P1}, G_{r1}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

将 $1M_0, 1M_{\frac{1}{2}}, 1M'_{\frac{1}{2}}, 1\bar{M}_1$ 代入式(3), 求得:

3.4 对燃料量的处理方法

燃料量信号从控制器中得到, 是作为动态模型的输入量。当在采样步长内, 把燃料量作为常数时, $G_{r1} = G_{r0}$ 。若根据 G_{r0} 及 G_{r0} 前一步长的燃料量 G_{r-1} 对 G_{r1} 进行预测, 可以使计算结果更加准确。

$$G_{r1} = G_{r0} + \left. \frac{dG_r}{dt} \right|_{0 \rightarrow h} \quad (7)$$

当 h 很小时, 认为

$$\frac{dG_r}{dt} = \frac{G_{r1} - G_{r0}}{h} = \frac{G_{r0} - G_{r-1}}{h}$$

所以:

$$G_{r1} = G_{r0} + (G_{r0} - G_{r-1}) \quad (8)$$

同理:

$$G_{r\frac{1}{2}} = G_{r0} + \frac{1}{2}(G_{r0} - G_{r-1}) \quad (9)$$

对于动态计算过程的初始点, G_{r1} 无法用以上方法预估。这时, 可以假定第一个步长中燃料量保持不变, 并尽可能减小计算步长。

3.5 计算步长的选择

为提高计算速度, 应尽量把步长取得大一些, 这样就会减少动态过程的计算量。但是考虑到计算精度和龙格-库塔法的收敛性, 计算步长又不能取得太大。对于加减载计算, 取步长 $h = 0.15$ 秒, 这个步长既能保证计算收敛, 又能适于仿真需要。对于甩负荷计算, 由于开始时各种参数变化快, 所以步长应尽可能取得小一些, 随着时间增加, 步长可能逐渐加大。

4 电控装置

4.1 电控装置模型

对最大安全状态的控制: 控制装置监测

n_H, n_L, n_P, P_7 和 T_6 , 在机组启动、加速、正常运转或减载过程中, 如果这些参数中有一个达到了控制装置确定的预调值和最高水平, 控制装置就将燃料量限制在该最高水平极限。

控制启动和加速过程中的燃料量: 燃气在启动时正常点火之后, 控制装置通过等变率加速程序或压气机输出压力加速程序增加燃料量, 燃气发生器透平一直加速到低压压气机转速调节器控制的慢车转速为止。

防止减速过程中熄火, 控制装置能阶梯式地递减燃料流量, 因而控制装置保证速率降低按最小减速的燃料流量程序进行。

SK15HE 三轴燃气轮机设计工况环境温度 $t_a = 15^\circ\text{C}$ 。机组正常运行时, 为了延长机组使用寿命, 加、减载过程都很缓慢, 同时, 将 n_H, T_6, P_7 的基本、尖峰、最大限制值都调整为基本负荷时的 n_H, T_6, P_7 值。在设计工况 $t_a = 15^\circ\text{C}$, 当功率达到基本负荷时, n_H, T_6, P_7 也相应达到各自最大值; 当 $-40^\circ\text{C} < t_a < -20^\circ\text{C}$ 时, 工况升高首先遇到 P_7 最大 $P_{7\max}$ 限制; 当 $-20^\circ\text{C} < t_a < 15^\circ\text{C}$ 时, 工况升高首先遇到最大功率 N_{\max} 限制; 当 $15^\circ\text{C} < t_a < 40^\circ\text{C}$ 时, 工况升高首先遇到 T_6 最大 $T_{6\max}$ 限制。

加载过程中, 当 P_7, n_H, T_6 都小于最大限制时, 燃料量由低压压气机转速调节器和加速限制来控制。当 P_7, n_H, T_6 中某一个参数达到预调最大值时, 燃料量就仅由该最大限制来控制。

减载过程中, 燃料量由低压压气机转速调节器和减速限制来控制。甩负荷过程中, 动力透平调节器为主调节器, 同时限制甩负荷过程中的燃料量不低于最小值, 防止甩负荷过程中燃烧室熄火。

4.2 控制算法

4.2.1 加载和减载控制算法

SK15HE 三轴燃气轮机由低压压气机转速 n_L 来控制加减载过程, 通过改变 n_L 基准的变化速率来控制加减载速率, 此时, n_H, T_6, P_7

处于保护状态。把 t_i 时刻转速 n_{Li} 与 t_{i+1} 时刻 n_{Li+1} 基准 n_{Li+1} 相比较, 两者差做积分, 如果 $n_{Li+1} > n_{Li}$, 则积分结果要求增加燃料量, 如果 $n_{Li+1} < n_{Li}$, 则积分结果要求减少燃料量, 即:

$$\Delta G_f = \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (n_{Li+1} - n_{Li}) dt \quad (10)$$

式中 T 为常数, 已知 n_{Li+1} 随时间线性变化, 在假定从 t_i 到 t_{i+1} 一个步长中 n_{Li} 不变的情况下, 就可以用式(10)对加减载过程进行控制。

4.2.2 甩负荷控制算法

对于三轴燃气轮机, 由于动力透平和压气机是分开, 所以仅用动力透平转速 n_P 去控制甩负荷过程中的燃料量, 很容易超速。本机组为抑制动力透平超速, 在甩负荷时采用了低压压气机放气的办法, 在负荷失去后, 迅速减小燃料量, 然后打开低压压气机放气阀, 放掉 22% 的空气, 这样就防止了过早放气时, 燃烧室会超温, 同时也有效地抑制了转速飞升。

有差转速调节系统按照

$$\bar{G}_f = \bar{G}_{fx} + K \cdot (\bar{n}_s - \bar{n}_p) \quad (11)$$

的比例调节规律改变燃料量。

式中: $K = 1/\delta, \delta$ 为不等率, $\bar{n}_s = 1 + \delta$

$$\bar{G}_f = \frac{G_f}{G_{fmo} - G_{fx}}; \bar{n}_p = \frac{n_p}{n_{pfo}}$$

下标“mo”表示额定值, “fx”表示空负荷值。

5 实时仿真检测步骤

5.1 用微型计算机按上述方法建立仿真三轴燃气轮机静、动态特性及电控装置的模型, 得到机组各种动态过程的曲线。

对于三个转子的微分方程, 由可知的 n_{H0}, n_{L0}, n_{P0} 和 G_{f0} , 采用四阶龙格—库塔法积分, 积分中用到的各种系数 M_H, M_L, M_P 通过四维插值程序从不平衡工况计算得到的数组中求取。这样, 即可得到这一步长的转速和燃料量终值 $n_{H1}, n_{L1}, n_{P1}, G_{f1}$ 。由 $n_{H1}, n_{L1}, n_{P1}, G_{f1}$ 通

过插值从数组中求得 T_6, P_7 。当用软件代替控制器模型时,时间 t 及 $n_{H1}, n_{L1}, n_{P1}, G_{t1}, T_6, P_7$ 作为输入量,调控制装置模型子程序,得到修正后燃料量 $G_t = G_{t1} + \Delta G_t$,把 n_{H1}, n_{L1}, n_{P1} 和 G_t 作为下次动态计算的 n_{H0}, n_{L0}, n_{P0} 和 G_{t0} ,直到达到所需要的新的平衡工况点为止。当动态模型与实际控制柜相连时,各控制信号经 D/A 转换进入控制柜,控制柜由这些信号及控制柜开关信号给出末级功放信号,末级功放信号经 A/D 转换后到执行器、调节阀,来控制燃料流量 G_t ,这时把 $n_{H1}, n_{L1}, n_{P1}, G_t$ 做为下一步长的 $n_{H0}, n_{L0}, n_{P0}, G_{t0}$,开始下一个动态点的计算。

5.2 在机组和控制装置都正常工作的条件下,测得机组各种动态过程的实验曲线,根据实验曲线,对模型进行修正,使计算得到的各种动态过程和实验结果相一致。

采用折合参数,将动态计算结果和实验结果都折合到 $t_c = 15^\circ\text{C}$,以时间为横轴,将各个参数的计算值和实验值绘制成曲线,对计算值分段进行修正,将修正系数加到动态数学模型中去,得到修正后的动态数学模型。

5.3 把修正的燃气轮机动态数学模型与工作完好的实际控制装置相连,检验模型是否正确。在确认模型正确之后,用该模型检测电控装置,调整电控装置的各种给定值,直到在该电控装置控制下,得到的动态过程满意为止。这时,就可以用该电控装置安全、可靠地控制实际机组。

6 结束语

以上所建立的动态数学模型,考虑了燃气轮机的各种动态过程和环境温度变化对动态过程的影响,计算结果是准确的。图 5 是 $N_e \sim G_t$ 计算值与实验值比较,对于加载过程,在相同的 N_e 情况下,两条曲线最大燃料量偏

差 0.0175 kg/s,和当点的 G_t 实验值比较,得到相对误差为 3%。图 6 是减载过程中 $n_L \sim T_6$ 计算值和实验值比较,在相同 n_L 下,两曲线 T_6 最大偏差为 10K,和当点 T_6 实验值相比,

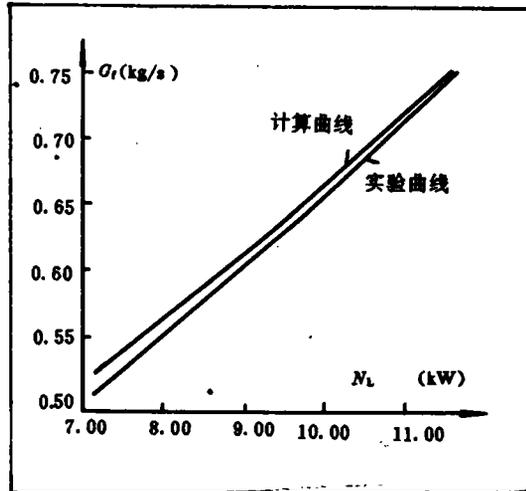


图 5 加载过程 $N_e \sim G_t$ 计算值与实验值比较

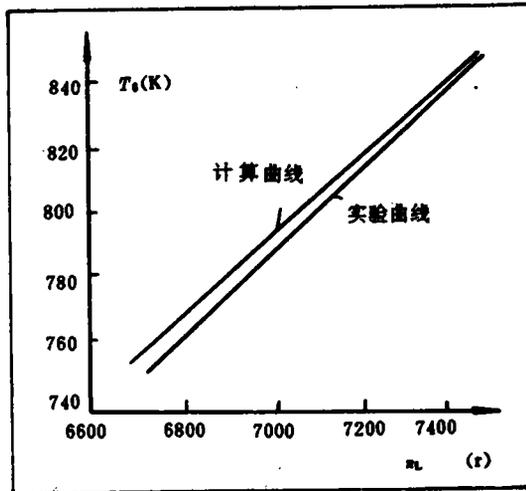


图 6 减载过程 $n_L \sim T_6$ 计算值与实验值比较

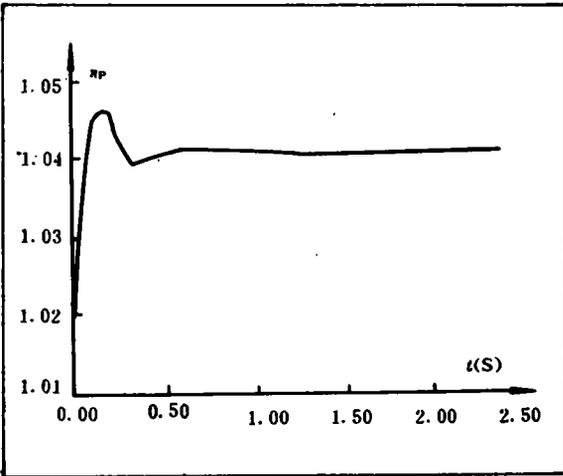


图 7 甩负荷过程中 \bar{n}_p 随时间 t 变化曲线
注:与大扰动法计算的 $\bar{n}_p \sim t$ 曲线重合

相对误差为 1.25%。图 7 是甩负荷过程中 \bar{n}_p

随时间 t 变化曲线,与用大扰动方法进行甩负荷计算得到的结果完全一致,但所用机时只是大扰动方法的 1/20。实际计算表明,动态计算速度非常快,在 AST 386X/20 计算机上,每调用一次四维插值子程序求取一个系数的时间约为 0.003 秒,调用一次龙格—库塔法对三个转子微分方程进行一次求解的时间约为 0.02 秒,这样的计算速度完全能满足实时仿真的需求。

参 考 文 献

- 1 吕泽华. 分轴燃气轮机大扰动动态过程计算. 燃气轮机技术, 1990, 3(2)
- 2 赵士忱. 三轴燃气轮机变工况计算和性能分析. 清华大学科学报告. TH86001. 1986
- 3 赵士忱, 倪维斗, 蔡青春. STAG106B 联合循环电站模拟培训器的机组数学模型. 燃气轮机技术, 1992, 5(2)

(编辑 渠源沛)

简 讯

增压流化床燃烧室

据“Turbomachinery International”1993 年 11—12 月号报道,在第一台烧煤燃气轮机动力系统于斯德哥尔摩分区供热装置投运二年之后,此项技术已在把煤作为主要能源的几个国家得到日益增长的关注。二个这种装置正在欧洲运行,一个在美国运行。日本的 PFBC(增压流化床燃烧室)装置也已接近完成,并且日本五个公用事业公司已把 PFBC 电站列入其发展计划,规划在 2002 年前有 2240 MW 投入使用。

进入使用的第一台 PFBC 装置是斯德哥尔摩 Energi 热电站的 Vartan 分区供热装置,该装置提供 135 MW 电力和 225 MJ/S 热量。该装置于 1991 年 3 月达到了全负荷输出,并于 1991 年中投入商业运行。到 1993 年 5 月它已累计运行 14 500 小时以上,利用率达到 98%,NO_x 排放低达 14 ppm,很好满足了斯德哥尔摩这一港口城市对环保的严格要求。

(学牛 供稿)

CONTENTS

- (250)EGT Experience with Gas Turbines Burning Ash-Forming Fuels.....M. Moliere, J. P. Gazonnet, J. P. Vinicersi
- (261)A Dynamic Mathematical Model of SK15HE Gas Turbine And Its Simulation by the Use of a Real-time Simulator.....Lu Zehua, Zhao Shihang, Xu fusheng (*Tsinghua University*)
With SK15HE three-shaft gas turbine serving as an example the authors have set up a dynamic mathematical model for the real-time simulation of a three-shaft gas turbine. On the basis of the special features of the turbine control system a diagnostic detection is conducted of the gas turbine control system with the help of a real-time simulator, thereby solving the contradiction between simulation precision and simulation duration in a satisfactory manner. **Key words:** *gas turbine, mathematical model, real-time simulation*
- (269)Orthogonal Optimization Control of Boiler Thermal Efficiency..... Zhu Jianing (*Nanjing Electric Power Advanced Technical School*)
Through a functional relation for calculating boiler thermal efficiency and by the use of a computation method in mathematical statistics an optimized parameter control value has been determined, which can lead to an enhanced boiler operating efficiency. **Key words:** *boiler efficiency, optimization control*
- (275)The Determination of NO_x Content in Flue Gases of a 600 MW Boiler Installed at Pingwei Power Station and a Study on the Effectiveness of its Reduction..... Yuan Xiaobo (*Harbin Power Plant Equipment Design Institute*), Wu Banqiu (*Harbin Institute of Technology*)
This paper describes the procedures for determining the NO_x content in flue gases of boiler NO_x installed at Pingwei Power Station. A secondary air swinging nozzle has been installed at the boiler top to reduce the NO_x content in boiler flue gases. An analytical study on the effectiveness of such a method was also undertaken. **Key words:** *NO_x determination, NO_x reduction, boiler unit*
- (280)A New Method for Designing the Grate Firing Furnace Arch with a Highly Turbulent a-shaped Combustion Flame..... Huishien, Xu tongmo, Liu Zhongjun, Jiang Huishu (*Si'an Jiaotong University*)
Through an experimental study based on furnace aerodynamics and hydrodynamic theory the authors have come up with a new method for designing a grate firing furnace arch featuring highly turbulent a-shaped combustion flame. When calculated on the basis of an aerodynamic and resultant momentum method, the resultant momentum of the front and rear arch should emerge within the range of $2/3 \sim 4/5$ of the front arch straight section. When an intersection angle of $\delta \geq 110^\circ$ with the front arch straight section is formed the coordination of the front