

动,这就要求启动装置必须具有足够大的动力,以适应外界载荷的附加扭矩。

当燃气轮机带动机械负载时,机械负荷本身必然存在一定的转动惯量,因此,在进行模型建立及模拟的过程中,必须将负载本身的转动惯量考虑进去。

由于燃气轮机本身的运行特点,使得其运行范围本身受到一定的限制,在带动变速负载的情况下,当转速降低到设计转速的 90% 时,燃气轮机压气机就会进入到喘振的敏感区。

与并网发电用的单轴燃气轮机不同,在带动变速负载的情况下,必须将燃气轮机的转速快速稳定地调整到给定的转速基准值,因此,燃气轮机的转速控制系统必须采用无差调节的方式。总之,对于带动变速负载的单轴燃气轮机来说,其控制系统能否协调一致的工作是非常重要的。

3 机械驱动用单轴燃气轮机及其控制系统模型

图 1 为机械驱动用单轴燃气轮机及控制系统模型示意图。从图中可以看到,燃气轮机的控制系统主要包括转速控制系统、温度控制系统、加速度控制系统和压气机进口导叶控制系统等几个部分。其中转速控制系统、温度控制系统、加速度控制系统都产生相应燃料基准,经最小值选择器选择输出最小的燃料基准,燃料基准和转速的乘积后作为燃料供给模块的燃料信号,燃料控制系统动作,改变燃料量,从而实现改变燃气轮机工况的目的。在正常的运行情况下,转速控制系统输出的燃料基准是最小的,即转速控制系统起调节工况的作用。只在特殊的情况下,温度控制系统和加速度控制系统投入使用,保护机组的安全。

转速控制系统采用无差控制的形式。转速调节器为 PID 控制器,其输入为燃气轮机的实际转速和转速基准值,当两者的差值不为零时,转速调节器输出的转速燃料基准值将不断积分,直至实际转速和转速基准值之间的差值为零,转速调节器的传递函数为:

$$G(s) = W(Xs + 1) / (Ys + z)$$

在实际的运行过程中,可以通过调整转速基准值,达到调整转速的目的。

温度控制系统的主要作用是限制透平进口温度 T_3^* ,以避免对透平的进口叶片产生损害。在实际控

制系统中,温度控制系统并不直接对 T_3^* 进行控制,而是通过对排气温度 T_x 进行控制而实现对 T_3^* 的控制。温度控制系统是一个比例积分调节器(PI),即:

$$G(s) = (3.3s + 1) / \tau_T s$$

当测得的排气温度 T_x 高于温度基准 T_r 时,温度控制系统会不断减小温度控制燃料基准,直到排气温度低于温度基准为止。

在一些特殊情况下,如在需要进行余热再利用的情况下部分负荷运行时,需要对排气温度进行控制,使其达到尽可能的最大,从而整个系统获得最优的性能。这就需要通过进口导叶(IGV)控制来实现。IGV 控制系统如图 1 中所示,也为一个比例积分调节器(PI),即:

$$G(s) = 0.2(4s + 1) / 4s$$

其输入参数为实际的排气温度和排气温度基准值,对这两项的差值进行积分,直到差值为零。在实际过程中,进口导叶是不允许被完全关闭的,因此需要一个限制器对其调节范围进行限制。

IGV 控制器输出一个 IGV 角度信号,输入到 IGV 的执行机构——一个惯性环节中,执行机构完成改变 IGV 角度的任务。

在部分负荷下,燃气轮机的排气温度可以有短暂的超温。由于这种超温的超温量很小,同时时间也很短,因此不会对机组产生大的热冲击。可以超温的程度与 IGV 角度开度的大小成反比,即:

$$\Delta T = (1 - L_{igv}) * T_0$$

其中, ΔT 为超温量, T_0 为最大的超温量, L_{igv} 为 IGV 控制系统执行机构的行程。

加速度控制系统的作用是在某些特殊情况下,限制转子的角加速度不超过其给定值,以保证燃气轮机的机组安全。在正常情况下它不起作用,只有在轮机突然甩负荷时为抑止动态超速,或启动过程限制轮机的启动加速率中起作用,达到减少热部件的热冲击目的。

如图 1 所示,速度信号经过一个微分环节,计算出实际的加速度,然后,将此加速度与加速度的基准值进行比较,得出的偏差输入到加速度控制器——比例积分调节器:

$$G(s) = 100/s$$

比例积分的结果产生加速度燃料基准。当实际加速度大于加速度的给定值时,积分的结果使燃料基准值降低,减少燃料量,限制加速度的升高。

速度、加速度和温度控制系统产生的三个燃料基准命令经过最小值选择器进行选择后,输出的最

小燃料基准命令进入燃料供给系统。燃料泵的转速及燃料压力与转子转速成正比关系, 因此燃料基准值乘以实际转子转速, 就得到了实际燃料量信号。

燃料供给系统由两个串联阀组成, 第一个阀是速比阀, 根据转子转速控制燃料的压力。第二个阀为燃料控制阀, 控制燃料质量流量。通过两个阀的串联控制, 达到精确控制燃料质量流量的目的。由于从控制阀到燃烧室之间的容积效应的存在, 因此在模型中加入了一个容积效应的惯性环节。为简化起见, 燃烧室可看作为一个延迟环节, 即:

$$G(s) = e^{-s\tau_{CR}}$$

其中, τ_{CR} 为延迟时间常数。

在燃气轮机的实际运行过程中, 其性能受环境温度 T_a 的影响是很大的。为了反映这一影响, 在此模型中, 排气温度、排气温度基准值和排气量的计算都把环境温度作为一个修正的因素来进行考虑。

转速计算由下面两个公式来确定, 即:

$$M_T = f_2(n, w_f) = 1.16(w_f - 1.33)/n$$

$$\tau_1 \frac{dn}{dt} = M_T - M_{load}$$

计算得出转子的转速。其中, M_T 为燃气轮机的扭矩, n 为转速, w_f 为燃料流量, M_{load} 为外负载, τ_1 为转子的转动惯量。

透平排气温度是转速 n 、燃料量 w_f 、进口导叶 α_{IGV} 角度和环境温度 T_a 的函数, 由下面的函数来确定:

$$T_x = f_1(n, w_f, \alpha_{IGV}, T_a)$$

在实际过程中, 为保持一定的燃烧温度, 排气温度基准值的确定主要由压气机的出口压力来决定, 而出口压力是受很多因素影响的。为简化起见, 此模型把排气温度基准仅看作是环境温度的函数, 即:

$$T_{ra} = [T_r - 0.6(15 - T_a)]$$

其中的 T_{ra} 为排气温度基准, T_r 为设计工况下的排气温度基准值。

排气量的计算由下面的函数来确定:

$$W_x = f_3 = n[519/(T_a + 460)](L_{gv})^{0.257}$$

其中, L_{gv} 为 IGV 控制器的执行机构的行程。

4 模型的简化及模拟

在进行模拟之前, 首先对此模型进行了如下简化:

(1) 简单循环中, 燃气轮机的进口导叶只在启动过程才进行调节, 而在正常的运行情况下不进行调节, 因此模拟正常的运行工况时, 可以去掉 IGV 控制;

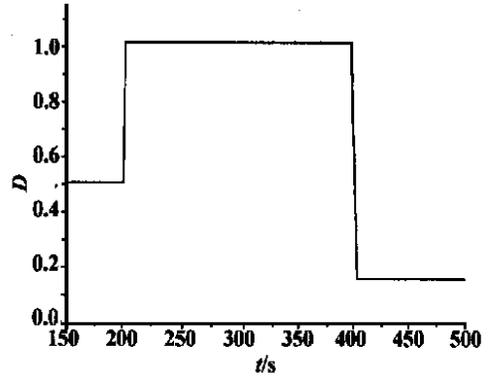


图2 负荷D变化曲线

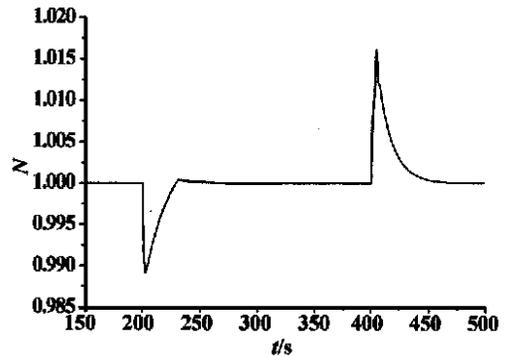


图3 实际转速N变化曲线

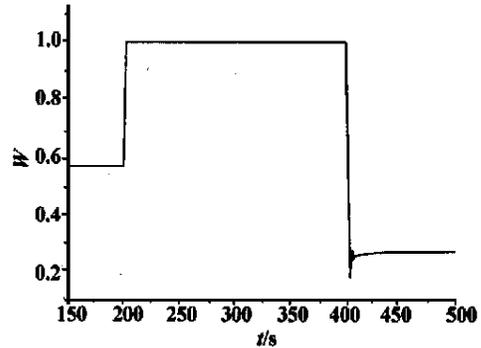


图4 燃料量W变化曲线

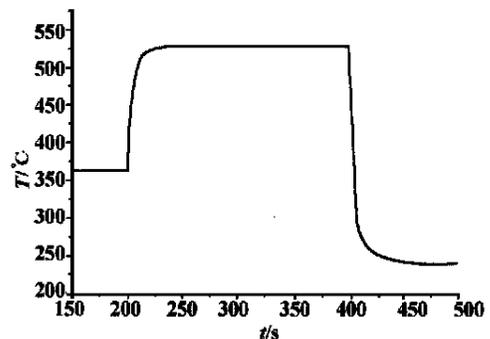


图5 排气温度T变化曲线

(2) 一般情况下, 机械负载和转速的变化都不会非常剧烈, 因此转子的加速度一般都低于加速度的上限, 即加速度控制不起作用, 可以将其去掉;

(3) 将燃烧室、比例阀和控制阀几个延迟环节和时间常数较小的环节省略。

首先对转速不变而负荷变化的过程进行了模拟, 图 2 ~ 图 5 为模拟结果。

到, 排气温度的变化曲线的过渡过程很平缓, 而燃料量和转速的变化则较快并有一定的波动, 这是由于温度控制系统较大的时间常数所造成的。

接下来对负荷不变而改变转速的过程进行了模拟, 图 6 ~ 图 9 为模拟结果。图 6 为设定的转速基准值的变化曲线。如图 7 所示, 经过微小的波动后, 实际转速在转速基准值变化后迅速改变, 经过微小的波动后, 能够迅速地稳定在基准值上。图 8 所示燃料量与转速基准值的变化趋势基本一致, 变化过程中存在一定的波动。图 9 所示的排气温度, 经过一定的波动后基本保持不变。

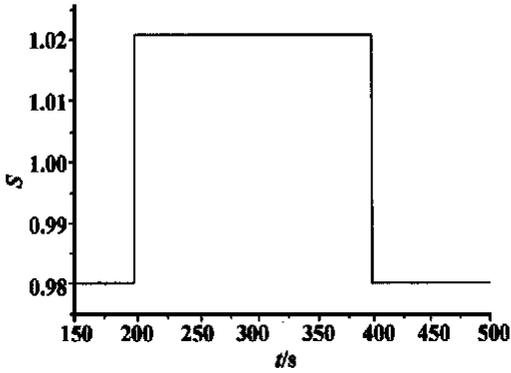


图 6 转速基准 S 变化曲线

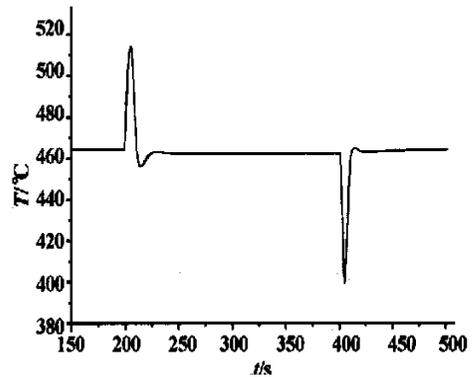


图 9 排气温度 T 变化曲线

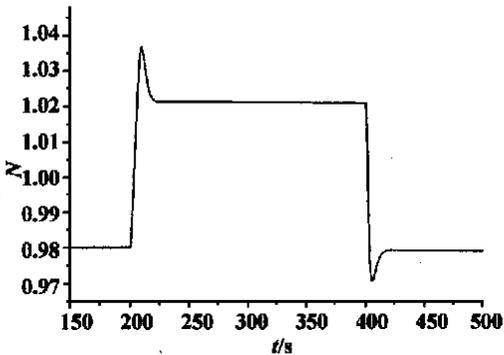


图 7 实际转速 N 变化曲线

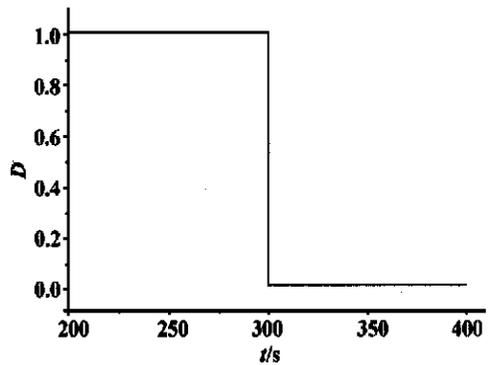


图 10 负荷 D 变化曲线

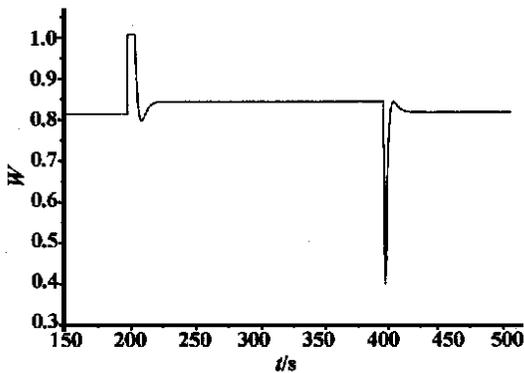


图 8 燃料量 W 变化曲线

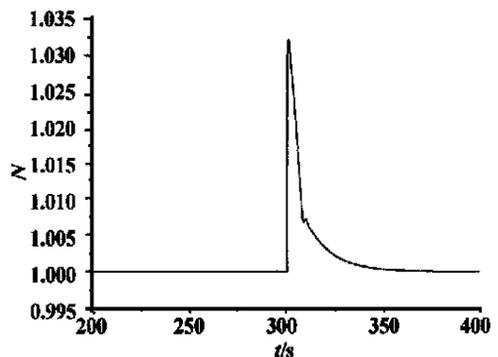


图 11 实际转速 N 变化曲线

图 2 为设定的负荷变化曲线。由图 3 可以看到, 随着负荷的升降, 转速会有微小的波动, 但很快又能够稳定在转速基准值。而图 4 所示的燃料量及图 5 所示的排气温度也随负荷的升降而升降。同时可以看

从两个过程的模拟结果来看, 此模型的模拟结果与实际物理过程是相吻合的。同时可以看到, 模型中所应用的控制系统, 完全能够满足升降负荷及转速的要求。

为了对模型及控制系统的动态特性作进一步的验证, 对恒速条件下燃气轮机的甩负荷过程进行了模拟, 结果如图 10 ~ 图 13 所示。

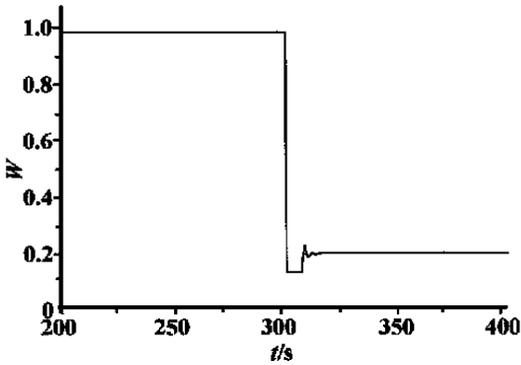


图 12 燃料量 W 变化曲线

图 10 为甩负荷过程中负荷变化曲线, 即设定负荷从其最大值 1 迅速降到最小值 0。由图 11 可以看到, 转速在经过一个波动后, 能够很迅速地稳定到原来的转速值上。而图 12 所示的燃料量也会经过一个微小的波动后, 重新稳定下来。图 13 所示的排气温度的变化过程则较慢, 但它的波动量也是最小的。这一模拟结果说明此控制系统具有很好的稳定性。

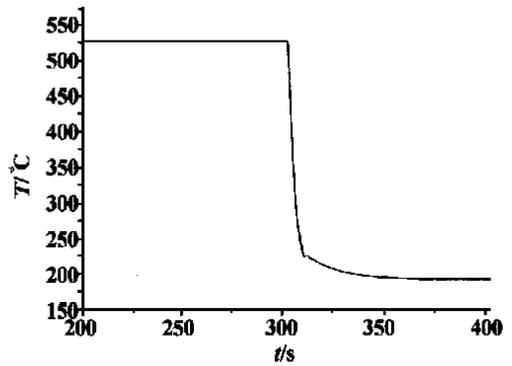


图 13 排气温度 T 变化曲线

本文在对机械驱动用单轴燃气轮机的调节特性进行分析的基础上, 以 GE 公司 5001R 燃气轮机为原型, 建立了机械驱动用单轴燃气轮机及其控制系统的模型, 并在 Matlab/Simulink 环境下对其进行模拟。模拟结果与实际物理过程相吻合, 因此, 此模型可以用于燃气轮机及其控制系统研究。模拟结果同时也表明, 此模型中的控制系统, 能够满足调节负荷和转速的要求, 并具有很好的稳定性。

参考文献:

- [1] 倪维斗. 热动力系统建模与控制的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] ROWEN W I. Simplified mathematical representations of heavy duty gas turbines[J]. *Journal of Engineering for Power of ASME*, 1983, 105(4): 865—869.

5 结论

(何静芳 编辑)

(上接第 293 页)

电厂实际运行提高制粉系统效率有重要的现实意义, 采用本文的模型进行分析可以帮助系统调试者找出影响制粉系统效率的因素, 从而真正地提高制粉系统的总体效率。文中以三种煤种在 5 个电厂的实际运行情况证实了该评判模型的客观性和有效性。

参考文献:

- [1] 电力工业部电力机械局, 中国华电电站装备工程(集团)总公司

编. 煤粉制备系统设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

- [2] 化工部热工设计技术中心站编. 热能工程设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [3] 水利电力部编. 电力生产过程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [4] 郭长岭, 郭高明. 发电厂制粉系统和磨煤机的等效能量评价方法及应用[J]. *中国电力*, 1995(4): 41—45.

(复 编辑)

cerning Faults and Malfunctions of a Dual-channel Steam Condenser on the Basis of a Simulation Model [刊, 汉] / MA Liang-yu, WANG Bing-shu, GAO Jian-qiang, MA Yong-guang, TONG Zhen-sheng (Research Institute of Simulation and Control Technology under the North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 298 ~ 302

In performing a fault diagnosis of thermal equipment it is usually difficult to create accurately and adequately a fault diagnosis knowledge base for the concerned equipment. This comes about because of two reasons: 1. Complexity of equipment, system and faults themselves; 2. Improper method of extracting the sample knowledge of frequently encountered faults. To cope with this problem, a new method for extracting fault sample knowledge of thermal equipment has been proposed by taking advantage of the technical edge enjoyed by simulation technology in the modeling of power station equipment and systems. By the use of the proposed method and through the creation of a dynamic mathematical model for a double-channel condenser a detailed simulation test of the equipment faults was conducted. On the basis of summing up on-site operating experience and performing a related theoretical analysis a typical fault knowledge base has been finally consummated for the dual-channel steam condenser. **Key words:** dual-channel steam condenser, failure and fault, sample knowledge extraction, simulation model

机械驱动用单轴燃气轮机动态模型研究 = Dynamic Model Research of a Single-shaft Gas Turbine in Mechanical Drive Applications [刊, 汉] / WEI Si-liang, LIU Shang-ming, NI Wei-dou (Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 303 ~ 307

With the continuous improvement in gas turbine performance its scope of applications is widening dramatically. Apart from its use in power generating units and combined cycle power plants there emerged ever more cases of its application as a variable-speed mechanical drive unit. Presented in this paper is a model of single-shaft gas turbine in mechanical drive service including its control system. The model has been simplified in light of specific conditions. Under a Matlab/Simulink environment a simulation was conducted of the process of load and speed increase-decrease as well as load rejection. The results of simulation agree quite well with actual physical processes. Hence, the proposed model can be employed for the study of a single-shaft gas turbine and its control system. **Key words:** gas turbine, simulation, dynamic model.

电站锅炉燃烧系统仿真模型的建立 = The Building of a Simulation Model for a Utility Boiler Combustion System [刊, 汉] / CHEN Li-jia, WANG Zi-cai, ZHU Qun-yi (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 308 ~ 310

In a real-time simulation system for a utility boiler it is common practice to adopt a zero-dimensional model for building a model of combustion system. This is understandable, because the aim of a simulation consists in simulating the dynamic behavior of an actual system in its full range of operation. However, the zero-dimensional model has oversimplified the complicated process of a combustion system. In view of this, when the operating load of a system fluctuates over a relatively large range, there will emerge a very large error or difference between a zero-dimensional model and an actual system. Under proper hypothetical conditions the authors have set up a one-dimensional model capable of reflecting the interior conditions of a combustion system and performed a simulation of the model. The results of simulation indicate that the recommended model features a very high precision. It has already been employed on the simulation of a 210 MW thermal power plant with its suitability for the intended purpose being verified. **Key words:** utility boiler, combustion system simulation, combustion model, real-time simulation

非线性时间序列的RBF神经网络预测方法及其应用 = A Method for Predicting Nonlinear Time Series Using RBF (Radial Base Function) Neural Network and Its Application [刊, 汉] / ZHANG Chuan-bin, DENG Zheng-long (Astronautics Institute under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 311 ~ 312, 342

An innovative method involving the use of RBF (radial base function) neural network based on a training algorithm of au-