

# 燃气轮机可调桨推进装置实时混合仿真

翁史烈 张百年 朱 宏

(上海交通大学)

**[提要]** 本文介绍了三轴燃气轮机及可调桨推进装置的数学模型以及用DO960混合仿真机及多变量、双变量函数发生器的实时仿真模型。仿真结果表明,该仿真模型在速度上达到实时要求而在精度上与非实时仿真模型一致。

**主题词** 计算机模拟 混合模拟 燃气轮机 变距螺旋桨

## 一、燃气轮机可调桨推进装置的数学模型

### 1. 燃气轮机数学模型

对于如图1所示的三轴燃气轮机,描述其动态过程的主要方程式为:

$$\begin{aligned} KI_1 &= \frac{dn_1}{dt} = \Delta\theta_1 \\ KI_2 &= \frac{dn_2}{dt} = \Delta\theta_2 \\ KI_3 &= \frac{dn_3}{dt} = Q_e - Q_L - Q_f \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $I$ ——转子转动惯量

$k$ ——常数

$n$ ——转速

$\Delta Q$ ——转子剩余力矩

$Q_e$ ——动力涡轮力矩

$Q_L$ ——推进装置阻力矩

$Q_f$ ——减速齿轮和轴系摩擦力矩

为了求解这一组方程,还须借助部件特性方程及参数联系方程组<sup>[1]</sup>。

决定该燃气轮机任一非平衡状态的,除了控制量(燃油量 $W_f$ )外,还有 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$

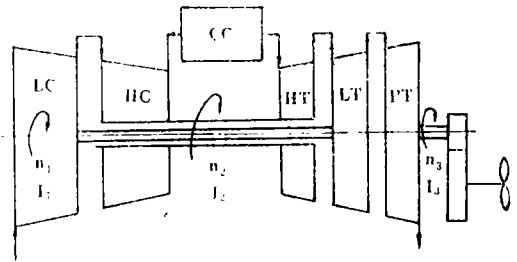


图1 船用三轴燃气轮机简图

三个变量。因而发动机非平衡状态的其它参数都可表示为这四个变量的函数:

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 &= f_1(W_f, n_1, n_2, n_3) \\ \Delta Q_2 &= f_2(W_f, n_1, n_2, n_3) \\ N_e &= f_3(W_f, n_1, n_2, n_3) \end{aligned} \quad (2)$$

.....

$$z_i = z_i(W_f, n_1, n_2, n_3)$$

式中  $N_e$ ——燃气轮机有效功率

$z_i$ ——燃气轮机任何一个非平衡参数

如果假定在非平衡过程中,低压转速 $n_1$ 的变化仍满足稳态时的关系即 $n_1 = n_1|_{ss} = f(n_2)$ 以及动力涡轮转速 $n_3$ 对流量特性的影响较小,可以忽略。则任一非平衡状态的参数为由 $W_f$ 及 $n_2$ 两个参数所定义的准动态运行面所决定<sup>[2]</sup>,该运行面如图2所示。真正非平衡过程中的参数可以以上述准动态运行

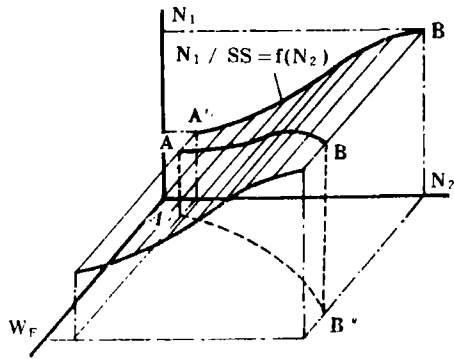


图 2 准动态运行面

面所决定的参数为基础，加上  $n_1$  及  $n_3$  对参数影响的修正。可表达为：

$$z_i = z_i(W_f, n_1, n_2, n_3)$$

$$= z_i \Big|_{sf} + \frac{\partial z_i}{\partial n_1} \Big|_{sf} (n_1 - n_1|_{ss})$$

$$+ \frac{\partial z_i}{\partial n_3} \Big|_{sf} (n_3 - n_3|_{ss}) \quad (3)$$

式中带下标“sf”的是准动态运行面上的参数或其偏导数，它们只取决于二个变量  $W_f$  及  $n_2$  而与时间无关，可以通过部件特性方程组及参数联系方程组求得。带下标“ss”的是稳态参数，它们是  $n_2$  的函数。

这样式 (2) 可表达为：

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_1 \Big|_{sf} + \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial n_1} \Big|_{sf} (n_1 - n_1|_{ss}) + \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial n_3} \Big|_{sf} (n_3 - n_3|_{ss})$$

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_2 \Big|_{sf} + \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial n_1} \Big|_{sf} (n_1 - n_1|_{ss}) + \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial n_3} \Big|_{sf} (n_3 - n_3|_{ss}) \quad (4)$$

$$N_e = N_e \Big|_{sf} + \frac{\partial N_e}{\partial n_1} \Big|_{sf} (n_1 - n_1|_{ss}) +$$

$$\frac{\partial N_e}{\partial n_3} \Big|_{sf} (n_3 - n_3|_{ss})$$

.....

将式 (4) 和式 (1) 结合起来，可得到三轴燃气轮机的过渡过程。

### 2. 可调桨推进装置的数学模型

描述可调桨推进装置动态过程的主要方程式为：

$$M \frac{dv_s}{dt} = T_p - R_T \quad (5)$$

$$KI_3 = \frac{dn_3}{dt} = Q_e - Q_b - Q_L$$

式中： $v_s$ ——船速

$M$ ——船体（包括粘附水）的质量

$R_T$ ——船体阻力。是船速  $v_s$  的函数，

图3

$T_p$ ——可调桨推力。 $T_p = T_p(K_T, t, t_p, n, D)$

$t$  为推力减额系数。 $t = 0.07$

$t_p$  为可调桨附加的推力减额系数。是螺距比函数，图4。

$Q_L$ ——可调桨阻力矩。 $Q_L = Q_L(K_Q, n, D)$

$K_T, K_Q$ ——可调桨推力系数、阻力矩系数。它们是进速系数  $J [J = \frac{v_A}{nD}, v_A = v,$

$(1 - \omega), \omega$  为船体伴流系数  $\omega = 0.04]$  和螺距比  $(P/D)$  的函数，见图5图6。

$R_T \times 10^{-3} \text{ kg}$

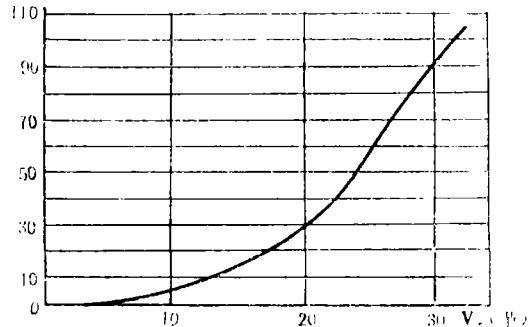


图 3 船舶阻力特性

可调桨推力系数  $K_T$  及可调桨阻力矩系数  $K_Q$  的图谱 (5) (6) 得自可调桨模型的船池试验，是在稳定参数下测试的。当应用这些图谱研究动态过程时，考虑到水流的扰动情况不同于稳定参数下的扰动情况，所以

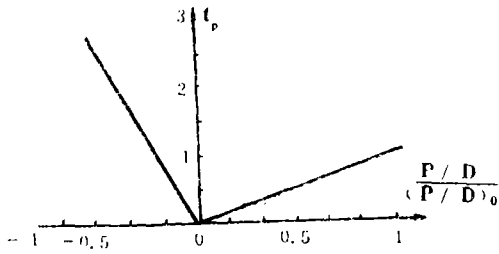


图4 推力减额系数  $t_p$

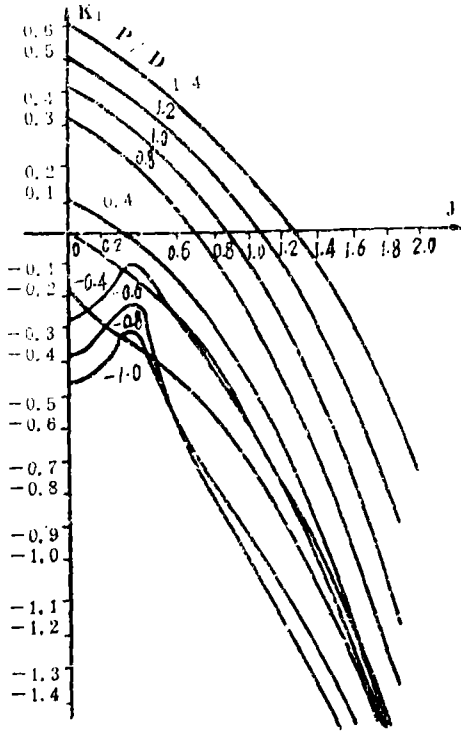


图5 推力系数  $K_T$

真正的推力及阻力矩比图谱所提供的推力和阻力矩有一时间延迟:

$$T_p = T_p^*(1 - e^{-10t}) \quad (6)$$

$$Q_L = Q_L^*(1 - e^{-10t})$$

式中  $T_p^* = K_T \rho n^2 D^4 (1 - ttp)$  由图谱  $K_T$  所确定的推力 (7)

$Q_L^* = K_Q \rho n^2 D^5$  由图谱  $K_Q$  所确定的阻力矩

## 二、燃气轮机可调桨推进装置的混合仿真模型

根据上面所确定的数学模型在DO960混

合仿真机上进行混合实时仿真。DO960混合仿真机具有模拟计算元件及数字式单变量函数发生器及多变量函数发生器。可以分别建立燃气轮机及推进装置的仿真模型。

### 1. 三轴燃气轮机混合仿真模型

用DO960混合仿真机的多变量函数发生器仿真方程(4),用模拟计算元件仿真方程(1)的等式左面部分,结合起来成为燃

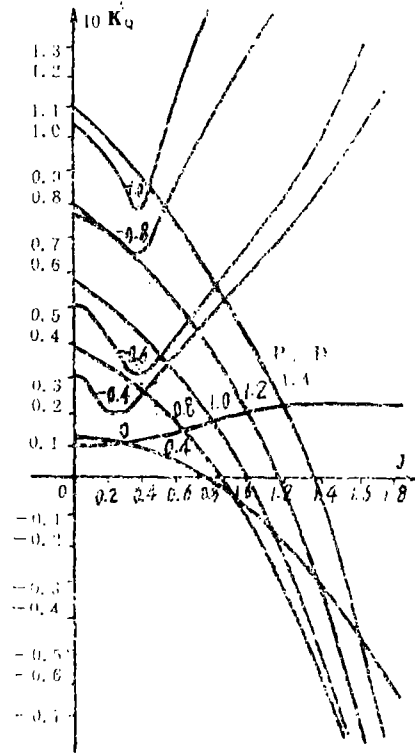


图6 阻力矩系数

气轮机仿真模型。

先计算准动态运行面上有关参数 ( $\Delta Q_1|_{sf}$ ,  $\Delta Q_2|_{sf}$ ,  $N_c|_{sf}$  以及偏导数  $\partial \Delta Q_1 / \partial n_1|_{sf}$ ,  $\partial \Delta Q_1 / \partial n_3|_{sf}$ ,  $\partial \Delta Q_2 / \partial n_1|_{sf}$ ,  $\partial \Delta Q_2 / \partial n_3|_{sf}$ ,  $\partial N_c / \partial n_1|_{sf}$ ,  $\partial N_c / \partial n_3|_{sf}$ ), 这些参数本应是  $W_1$  及  $n_2$  的双变量函数。实际上计算具体燃气轮机时发现一些偏导数与  $W_1$  关系较小, 可以作为仅是  $n_2$  的单变量函数<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial z_i}{\partial n_1} \Big|_{sf} \approx \frac{\partial z_i}{\partial n_1} \Big|_{ss}$$

一些偏导数近似于一组平行曲线, 可简化为

$n_2$ 的单变量函数加以适当修正[2]:

$$\left. \frac{\partial z_i}{\partial n_3} \right|_{sf} = \left. \frac{\partial z_i}{\partial n_3} \right|_{ss} + K \Delta W_f$$

再计算有关稳态参数 ( $n_1|_{ss}$ ,  $n_2|_{ss}$ ,  $W_f|_{ss}$ ), 这些参数是 $n_2$ 的单变量函数。

将计算所得的所有双变量函数值及单变量函数值以数组形式存储在多变量函数发生器的相应内存中。

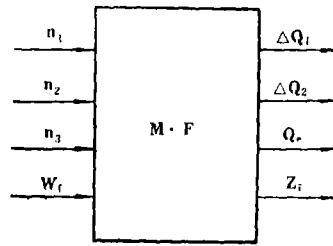


图 7 多变量函数发生器的输入输出参数

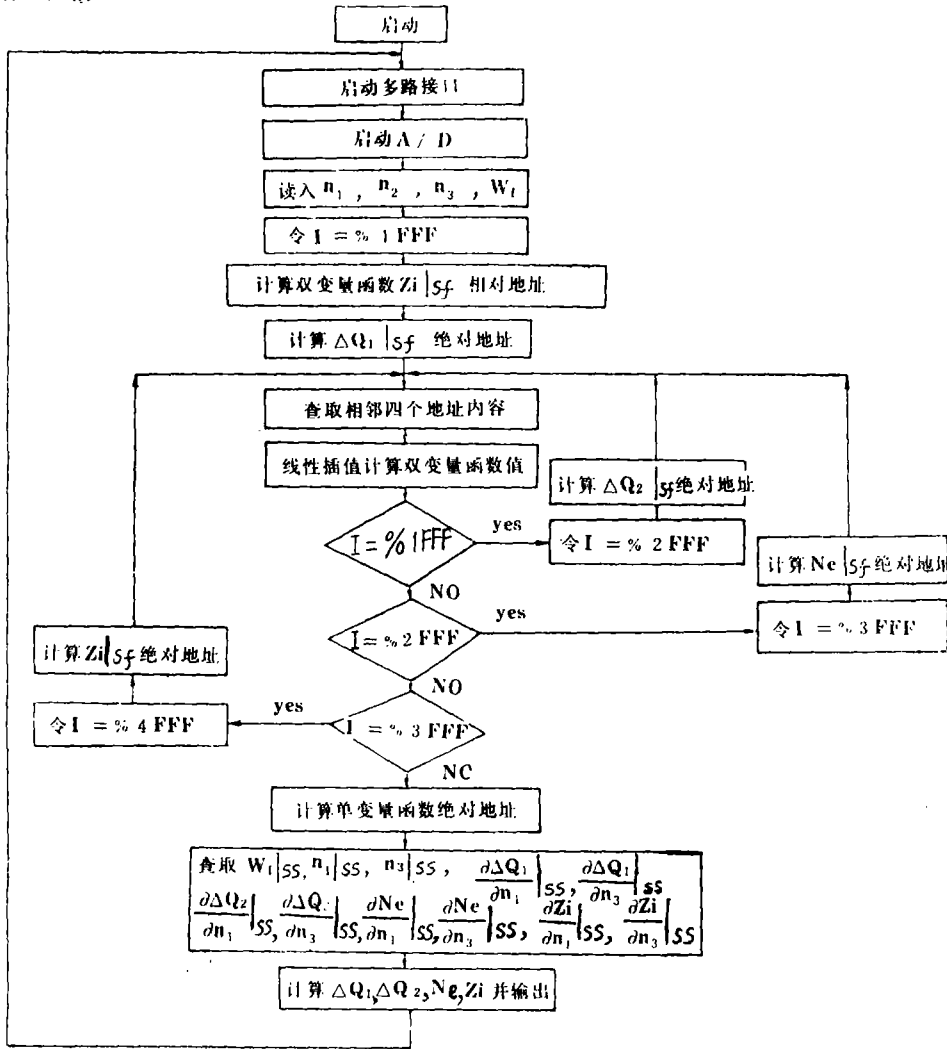


图 8 多变量函数发生器运行框图

多变量函数发生器的输入输出参数如图7所示; 其运行框图如图8所示。多变量函数发生器在主程序控制下, 由输入接口采样读入一组数据, 根据读入的  $W_f$  及  $n_2$ , 在内存

中查找准动态运行面上的双变量函数值 ( $z_i|_{sf}$ ); 根据读入的  $n_2$ , 在内存中查找单变量函数值 ( $\partial z_i / \partial n_1|_{ss}, \partial z_i / \partial n_3|_{ss}, n_1|_{ss}, n_3|_{ss}, W_f|_{ss}$ ); 根据方程 (4) 计算参数

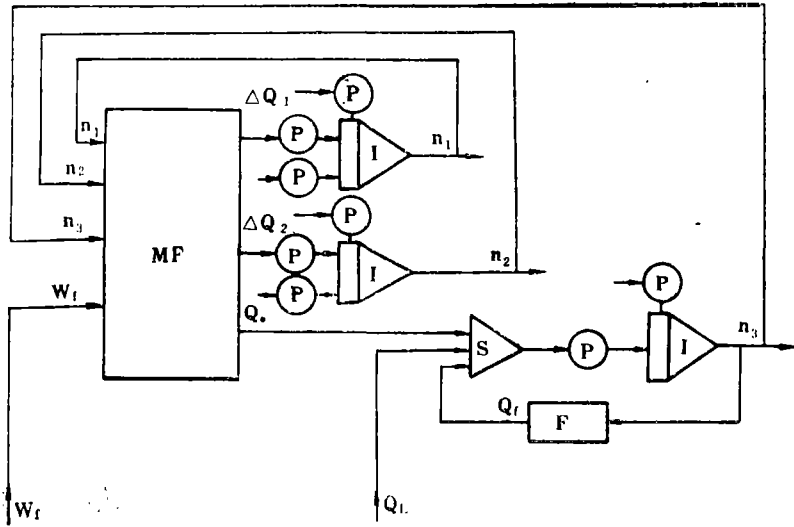


图 9 三轴燃气轮机混合仿真框图

$z_i$ , 并输出。完成这一循环后, 再采样读入一组新的数据, 重复上述计算。由于多变量函数发生器的主程序是由汇编语言构成的, 运算速度快, 完成一个采样周期为 1 毫秒, 在燃气轮机实时仿真中是允许的。

从多变量函数发生器得到方程 (4) 的解正是方程 (1) 等式右面的参数。根据方程 (1), 用混合仿真机上的积分器(I)、系数器(P)等运算元件仿真之。从而实现了燃气轮机混合仿真模型, 如图 9 所示。左面是多变量函数发生器(M.F), 完成方程 (4) 的运算, 右面是模拟计算元件, 完成方程 (1) 的运算。只要引入燃油量  $W_f$  以及可调桨推进装置的阻力矩  $Q_L$  的变化规律, 就能进行燃气轮机的实时仿真。

### 2. 可调桨推进装置混合仿真模型

用 DO960 混合仿真机的双变量函数发生器仿真数学模型中的双变量函数, 用模拟计算元件仿真方程 (5) ~ (7), 结合起来成为可调桨推进装置仿真模型。

将  $K_Q \rho D^5$  及  $K_T \rho D^4$  这两个双变量函数值及  $1-tt_p$  这一个单变量函数值以数组形式存贮在双变量函数发生器的相应内存中。

双变量函数发生器的输入输出参数如图

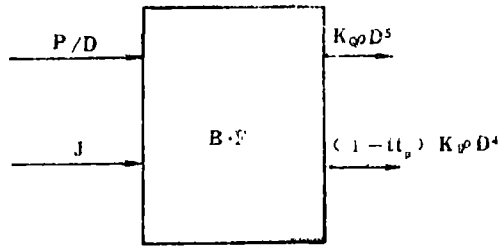


图 10 双变量函数发生器输入输出参数

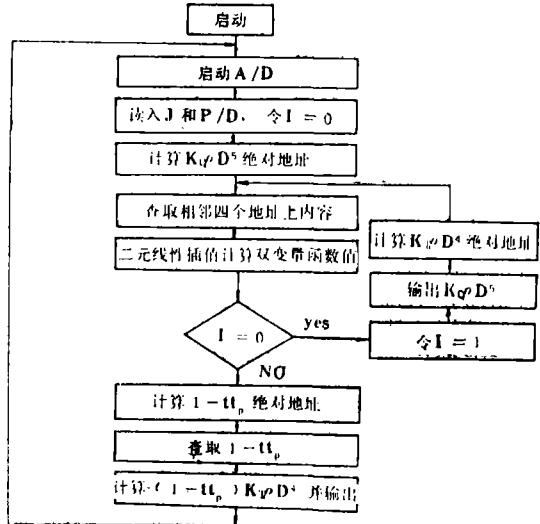


图 11 双变量函数发生器运行框图

10 所示, 其运行框图如图 11 所示。双变量函数发生器在主程序控制下, 由输入接口



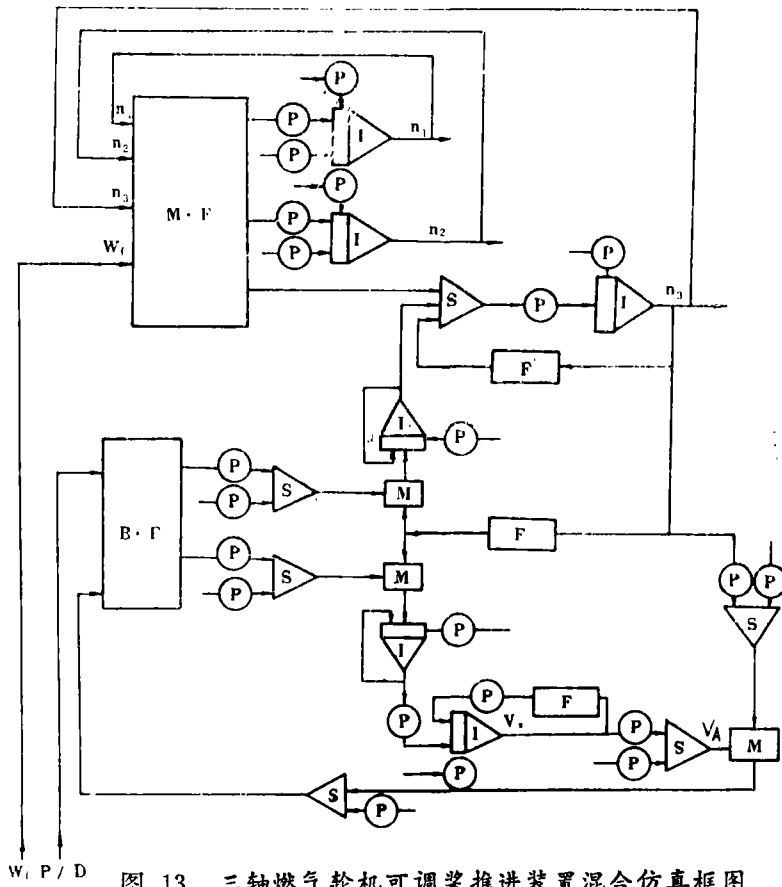


图 13 三轴燃气轮机可调桨推进装置混合仿真框图

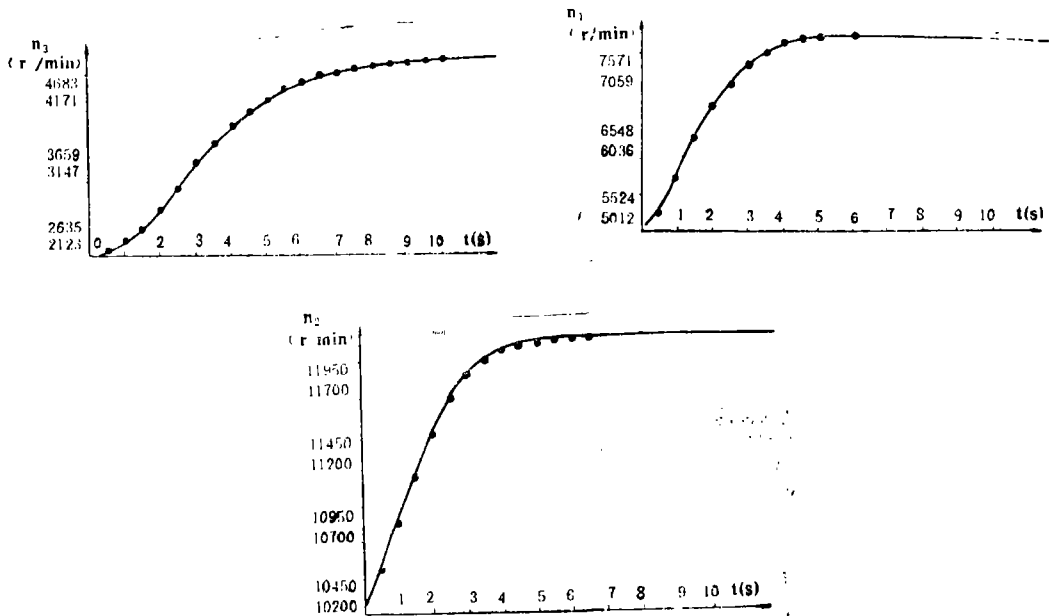


图 14 实时混合仿真结果

# Real-time Hybrid Simulation of Gas Turbine Controllable-pitch Propeller Propulsion

Weng Shilie, Zhang Bainian, Zhu Hong

(Shanghai Jiao Tong University)

## Abstract

This paper presents the mathematic model of a three-spool gas turbine controllable-pitch propeller propulsion unit and a real-time simulation model with a DO960 hybrid computer, multivariate function generator and bivariate function generator. It is shown that the real-time simulation has been obtained from the simulation model and the precision of the simulation model is as good as the non real-time simulation one.

**Key Words:** *hybrid computer simulation, gas turbine, controllable-pitch propeller, hybrid simulation.*

(上接15页)

feedback matrix. The decoupling compensator is designed by use of compensation in divided frequency ranges. A method of lead compensation for multivariable feedback systems is also presented.

A split-shaft gas turbine with adjustable nozzles is a nonlinear multi-input and multi-output system, in which the couplings are so complicated that it is very difficult to design decoupling compensators and controllers. In this paper, an example has been given to demonstrate how a decoupling compensator matrix and controller matrix is designed by use of the complex variable approach for such a linear multivariable feedback system. The simulation computation results show that satisfactory results have been obtained.

**Key words:** *gas turbine, adjustable vane, control system, mathematical analysis*