

# 船用分轴燃气轮机动态过程的实时混合仿真

翁史烈 苏明 张佰年

(上海交通大学)

[提要] 本文通过把发动机动态系统分解为与时间直接相关和无关的两个子系统的分析方法,探讨了实现发动机动态过程实时仿真的途径,提出了一个船用分轴燃气轮机动态过程实时仿真的方法,该方法可用于大扰动下发动机动态过程的实时仿真。用该方法在Dornier 960仿真机上作了某船用分轴燃气轮机加减速过程的实时仿真。所得的仿真结果实时记录曲线与相应的数字仿真结果完全一致。

主题词 燃气轮机 实时模拟 混合模拟

## 一、引言

燃气轮机研制过程中的一个重要环节是发动机动态过程的研究。在研制设计发动机时,除了要保证设计工况的性能,还要求具有良好的起动、加减速等动态性能。这样才能保证发动机在各种工况范围和运行条件下稳定可靠地工作。

利用计算机仿真技术来研究发动机动态特性是分析、研究发动机控制规律,研制控制系统的有效途径。随着发动机性能的日益提高,控制规律更加复杂。计算机数控技术的应用,对发动机动态过程的仿真技术提出了更高的要求。不仅需要动态过程有效的预测,而且还要求实时仿真动态过程。因为在实时仿真系统上可进行在真实发动机上无法进行的试验,在控制系统的试制过程中可以利用仿真系统代替真实的发动机进行数控软件、硬件及整个控制系统的调试或考核。从而避免因发动机超温、超速而造成的损坏和危险。

在发动机实时仿真方面,国外已有文章介绍这方面的研究工作[1][2][3]。其中较为引人注目的是美国NASA对航空发动机的实时仿真及数字控制的研究。国内在这方面的研究工作也已开始[4]。由于模拟计算机和混合仿真机具有并行工作的特点,在实时仿真中具有很大的优越性。利用模拟计算机或混合仿真机仍是进行发动机动态过程实时仿真的有效途径。目前,开发和利用现有的模拟或混合仿真机是一个具有现实意义

本文收到日期:1987年2月6日

的课题。其中包括两个方面：其一是现有仿真机功能的开发。就目前大多数混合仿真机和为数众多的模拟机而言，都没有配置专用的双变量或多变量函数发生器。为开发和提高现有仿真机的功能，我们研制了具有较高性能价格比的数控双变量函数发生器，其速度和精度均能满足燃气轮机实时仿真的要求。其二是仿真方法和途径的探讨。本文重点是探讨发动机实时仿真的途径，提出一种分轴燃气轮机实时仿真的方法。该方法不仅对模拟或混合实时仿真，而且对数字仿真也具有意义。

## 二、发动机动态过程的数学模型

燃气轮机的动态过程通常可以用三类方程组来描述：(a) 惯性环节的微分方程组；(b) 部件特性方程组；(c) 参数联系方程组[5]。

惯性环节包括转子的转动惯性，各部件间通道的容积惯性和燃烧室的热惯性等。容积惯性和热惯性远较转动惯性小，相应参数的时间响应也极快，在动态过程的计算中通常可将其影响略去。方程组(a)中主要是转子惯性的微分方程。对船用分轴燃气轮机(例如LM2500)来说，方程组(a)由如下二式组成：

$$\begin{aligned} I_G \cdot K \cdot \frac{dN_G}{dt} &= \Delta Q_G \\ (I_{P_1} + I_L) \cdot K \frac{dN_{P_1}}{dt} &= \Delta Q_{P_1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $N_G$ ， $\Delta Q_G$ ， $I_G$ 分别表示燃气发生器转子的转速，剩余扭矩和转动惯量， $N_{P_1}$ ， $\Delta Q_{P_1}$ ， $(I_{P_1} + I_L)$ 表示动力涡轮和负荷转子的转速，剩余扭矩和转动惯量。

以上两个方程再加上部件特性方程和参数联系方程就组成了一个非线性系统。在后两个方程组中包含了大量非线性代数方程和列表函数。因此，动态过程方程组的求解是一个十分复杂的过程。

由对燃气轮机系统的分析可知，决定分轴系统非平衡工况状态的，除了控制变量，还决定于两个独立的状态变量，通常选 $N_G$ ， $N_{P_1}$ 。假如是单变量系统，控制变量通常是燃油量 $W_F$ 。一旦这三个变量的数值确定后，整个系统的状态就确定了。发动机的所有参数也唯一确定。从而可以计算出涡轮和压气机的功率、扭矩及剩余扭矩，还可以计算出动力涡轮的输出功率等。因而微分方程的右函数实质上可写成如下函数式：

$$\begin{aligned} \Delta Q_G &= f_1(N_G, N_{P_1}, W_F) \\ \Delta Q_{P_1} &= f_2(N_G, N_{P_1}, W_F) \end{aligned}$$

方程组(1)可以写成：

$$\begin{aligned} I_G \cdot K \cdot \frac{dN_G}{dt} &= f_1(N_G, N_{P_1}, W_F) \\ (I_{P_1} + I_L) \cdot K \cdot \frac{dN_{P_1}}{dt} &= f_2(N_G, N_{P_1}, W_F) \end{aligned} \quad (2)$$

其它输出参数(如燃气初温 $T_3$ 等)也有类似表达式，以 $Y_i$ 表示某一输出参数，则

$$Y_i = g_i(N_G, N_{P_1}, W_F) \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

为了实现计算机实时仿真,我们认为可以把由三个方程组描述的动态系统分解成性质迥异的两个子系统(见图1)。其中方框A是这样一个子系统:它本身与时间 $t$ 无关,只包含(b)、(c)两类方程。其输出只取决于三个自变量 $N_G$ 、 $N_P$ 和 $W_F$ 。而另一个子系统——方框B则与时间有关。子系统A中贮存着大量的曲线和列表数据,例如压气机特性、涡轮特性、气体热力性质等等。其运算特征是查表插值和各种代数运算。子系统B中没有大量的数据贮存,而运算特征是积分运算。

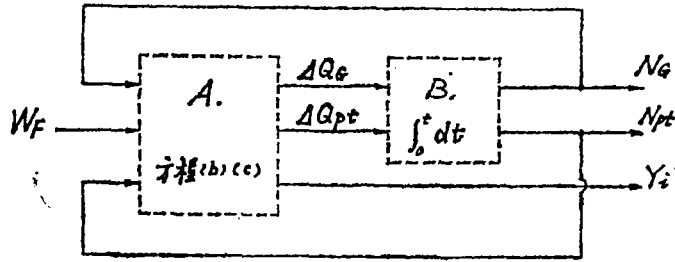


图1 动态系统分解图

把原动态系统分解成图1的两个子系统后,对其分析就简明了。众所周知,数字仿真的最大问题是在常规的计算机上即使是发展并不太快的发动机动态过程也难以达到实时的要求;而混合仿真的最大问题是数学模型往往受到计算元件(如积分器,加法器等)配置的限制。因而在发动机的混合仿真中,A框的求解是非常关键的。如果A框处理得好,往往就可以在一般配置的混合机上实现发动机实时仿真。

### 三、发动机实时仿真的途径

在燃气轮机实时仿真中,以往通常采用的方法是在模拟或混合机上,把方框A中的各部件特性和参数联系方程用计算元件建立相应的模拟变量关系,即用函数发生器复制各部件特性、图表函数和解析函数,用加法器和乘法器仿真各参数的联接关系。这种方法的一个特点是各变量(包括许多中间变量)之间的相互关系很直观,但需要用到较多的计算元件。在实际应用中会受仿真机规模的限制。另外系统回路较多,反馈环节复杂,系统的排题和调整工作量很大。

另外还有一条途径是预先对方框A作简化。在这方面用的较多的是以线性化为为基础的方法。按其化简的程度可归纳为:(1)在某一固定稳态点上作线性展开的完全线性化方法[6];(2)在几个不同的稳态点上线性化的分段线性化方法[7];(3)在所有稳态点(即沿稳态线)对控制变量 $W_F$ 等作线性化处理的方法[8]。显然最后一种方法较为准确。但是,它与前两种方法一样,由于对控制变量 $W_F$ 作了线性化处理,只有当动态过程中的控制量 $W_F$ 偏离稳态线上的值较小的情况下才是准确的。然而在实际的动态过程中,特别是在加减速过程中,富油量(或贫油量)往往都较大。

我们在对发动机动态系统用前面所述的两个子系统的方法所做的分析基础上,提出另一种方法:从非线性的数学模型出发,给定子系统A的各输入参数,计算相应的输出参数。对于一系列不同的输入量,就可求得输出量相应于输入量的函数关系。在实时仿

真中借助于函数发生器，用这个预先求得的函数关系代替原来复杂的、含有诸多方程的子系统A。因为从这个函数关系中可以得到原子系统A在任意一组输入量下的相应输出量，所以可用它进行任意动态过程的实时仿真。这样处理有三个特点：第一，没有对控制变量 $W_F$ 作线性化处理，而是直接求解子系统A中的非线性方程组。对控制量 $W_F$ 为大扰动的情况也是准确的。第二，方框A的计算是在数字机上进行的，在计算中可以考虑更多的影响因素（如变比热等）。第三，可以用很少的计算元件实现发动机动态过程的实时仿真。

这一设想并不局限于模拟或混合仿真，对于数字仿真也是有意义的。在数字仿真的积分计算中，每一步都需要较长的时间用于右函数的计算。这是因为往往需要迭代计算，以满足流量平衡条件。整个动态过程数字仿真所需的计算时间则更加可观。如果按以上设想分两步进行：先将右函数和其他所需的输出参数相应于控制量 $W_F$ 、状态变量 $N_G$ 、 $N_{p,i}$ 的函数关系以列表函数形式算出，存入数据文件内。以后要进行不同供油规律下动态过程的数字仿真时，就只需插值运算就可求得右函数并进行数值积分了。这样可以有效地缩短动态过程数字仿真所需的计算时间。

#### 四、分轴发动机混合实时仿真模型

图2、3是压气机和涡轮的流量特性图。为简化计算，假定动力涡轮转速 $N_{p,i}$ 的变化对流量特性的影响很小，动力涡轮流量特性近似一条曲线(或是一条很窄的曲线带)，如图4所示。这一假定在动态计算中是经常采用的。利用数字计算机可以方便地求出微分方程的右函数以及其它输出参数。由于略去了 $N_{p,i}$ 的影响，方框A(见图1)的输出参数 $\Delta Q_G$ 、 $Y_i (i=1; 2 \dots, m)$ 都只是两个变量 $N_G$ 、 $W_F$ 的函数，而 $\Delta Q_{p,i}$ 仍然与转速 $N_{p,i}$ 有关，但它可以用动力涡轮的输出功率 $NE_{p,i}$ 通过下式表示：

$$\Delta Q_{p,i} = Q_{p,i} - Q_L = C \cdot \frac{NE_{p,i}}{N_{p,i}} - Q_L$$

这样，图1中的方框图转化为图5的形式，其中的A'由原来的方框A演化而来。

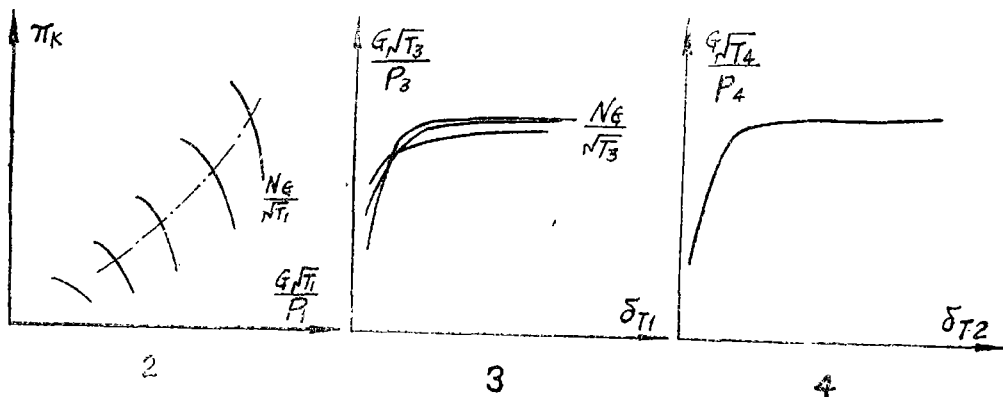


图2、3、4 压气机和涡轮的流量特性图

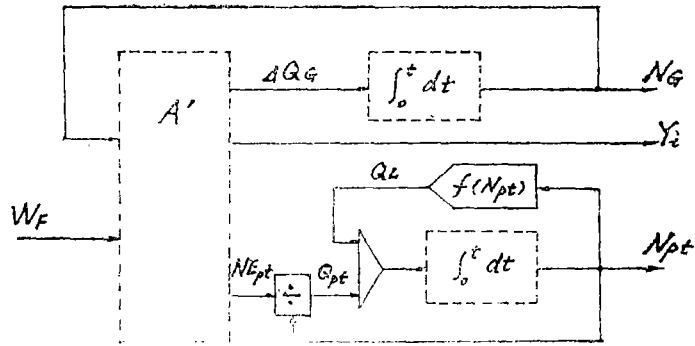


图 5

具体介绍我们建议的  $A'$  框的处理方法。在图 2 所示的压气机流量特性中的点划线是发动机的稳态线。在一个转速  $N_c$  下，有一个相应的稳态点，该点的燃油量记为  $W_F/ss$ 。在同一个转速下，当燃油有一个增量  $\Delta W_F = W_C - W_F/ss$  时，发动机处于非平衡工况。这时转子的功率不再平衡，在压气机流量图上工作点偏离稳态点沿等转速线向上（当  $\Delta W_F$  为正）或向下（当  $\Delta W_F$  为负）移动。所以，沿稳态线在不同转速  $N_c$  下取一系列  $\Delta W_F$  值，可以计算出相应的发生器转子剩余力矩  $\Delta Q_G$ 、动力涡轮输出功率  $NE_{pt}$  和别的输出参数  $y_i$ ，从而得到函数关系： $\Delta Q_G \sim N_c, \Delta W_F$ ； $NE_{pt} \sim N_c, \Delta W_F$ ； $y_i \sim N_c, \Delta W_F$ 。 $\Delta Q_G$  和  $NE_{pt}$  的函数曲线如图 6、7 示。

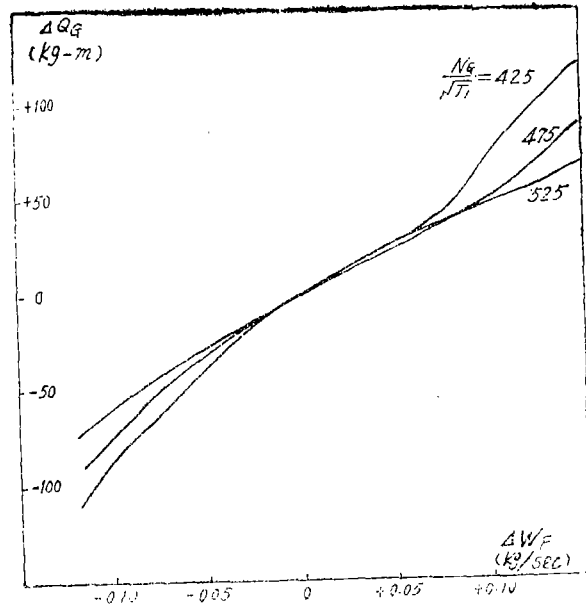


图 6 燃气发生器剩余力矩曲线

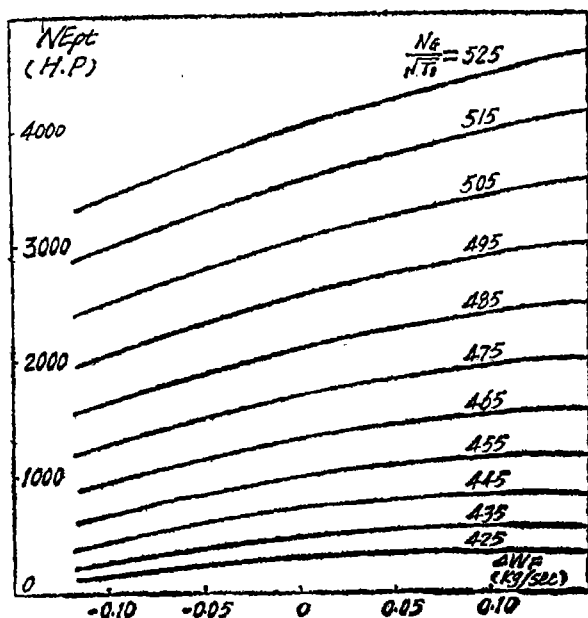


图7 动力涡轮输出功率曲线

用 $\Delta W_F$  代替变量 $W_F$  可以使以上函数关系式的计算和整理更为方便，物理意义更为明确。若以  $\Delta W_F = 0$  代入，就得到相应各参数的稳态值。有了这些函数关系，利用我们已开发的数控双变量函数发生器，就可以很方便地模拟或混合计算机上进行动态过程实时仿真。仿真框图中的主要方程如下：

$$N_c = \int_0^t \frac{1}{I_c \cdot K} \cdot \Delta Q_c dt + N_c/t = 0$$

$$N_{p,i} = \int_0^t \frac{1}{(I_{p,i} + I_L) \cdot K} \Delta Q_{p,i} dt + N_{p,i}/t = 0$$

$$\Delta Q_{p,i} = Q_{p,i} - Q_L$$

其中负荷特性 $Q_L = f(N_{p,i})$ 可以任意给定。其它输出参数，如燃气初温 $T_3$ ，压气机出口压力 $P_2$ 等，可用如下通式给出：

$$y_i = g_i(N_c, \Delta W_F) \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

### 五、仿真结果

用本文提出的方法对某船用分轴发动机在Dornier 960 仿真系统上进行了实时仿真。仿真框图的主要部分见图8。供油规律( $W_F = f(N_c)$ ) 如图9所示，其中曲线A为加速过程供油曲线，B为减速过程供油曲线。仿真结果的实时记录曲线在图10中给出。图10—a为加速过程，图10—b为减速过程。此外，为检验本方法仿真结果的准确性，在相同供油规律下进行了数字仿真，在图10中将两者进行了比较，

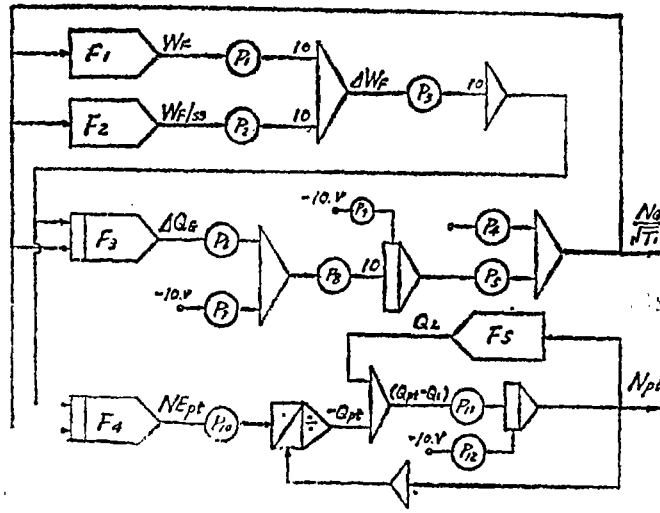


图8 分轴发动机实时仿真框图

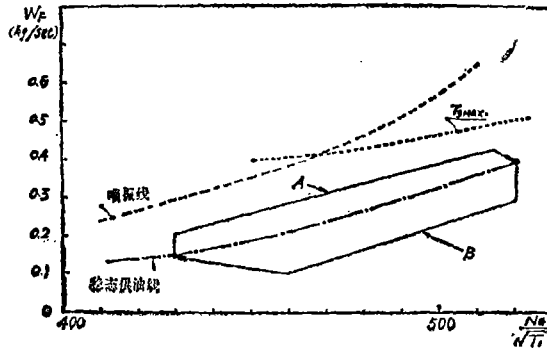


图9 供油规律曲线图

另外，还用沿稳态线将控制量  $W_F$  线性展开的方法对同一台发动机在 *Dornier 960* 仿真机上进行了实时仿真。并将结果也同数字仿真的结果进行了对比，见图11。

由图10、11两组结果可以看出：用本文提出的实时仿真方法所得的结果与在数字机上得到的数字仿真计算结果非常接近，在大扰动下（加减速过程中供油线均远离稳态供

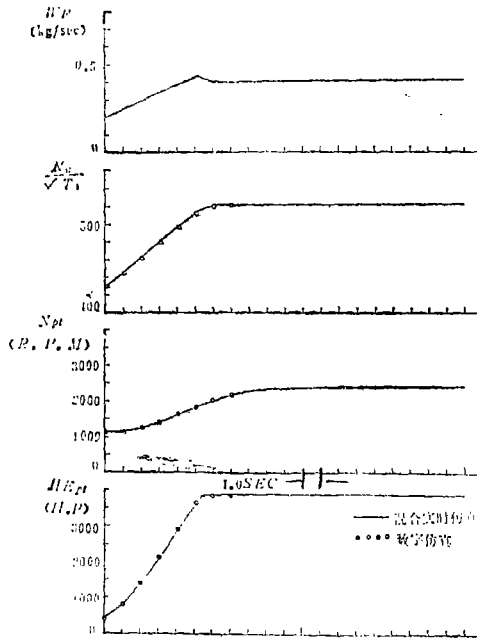


图10-a

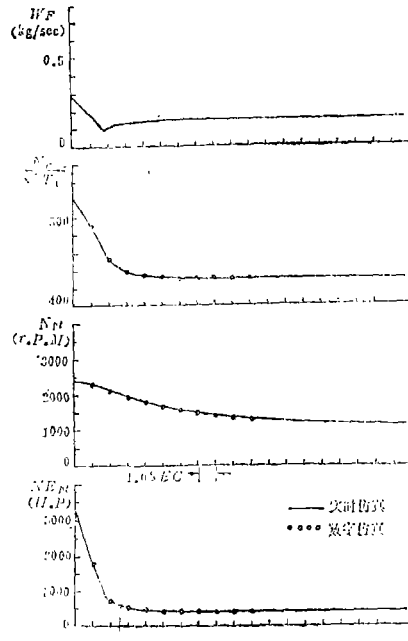


图10-b

图10 实时仿真结果曲线

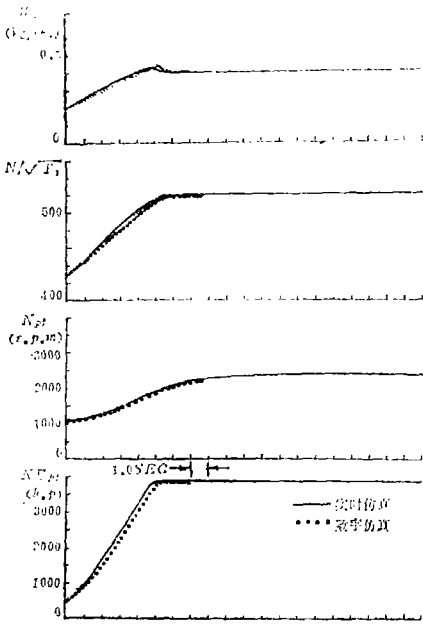


图11-a

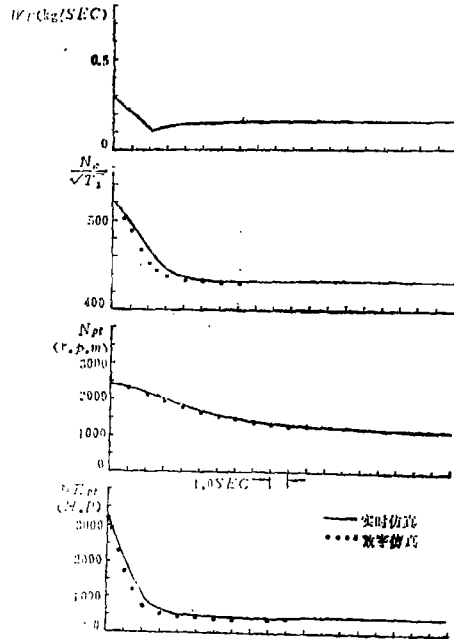


图11-b

图11 W\_F 线性化的实时仿真结果



油线) 仍可保证实时仿真结果准确。而建立在燃油量 $W_F$ 线性展开基础上的仿真方法, 由于动态过程中供油规律偏离稳态线较远, 结果就有偏差。

### 参 考 文 献

- [1] J·R·Szuch, K·Seldner, and D·S·Cwynar. "Development and Verification of Real-Time, Hybrid computer Simulation of F100—PW—100 (3) Turbofan Engine", *NASA TP—1034*, 1977.
- [2] J·R·Szuch. "Advancement in Real—Time Engine Simulation Technology", *NASA TM—82825*, 1982.
- [3] C·E·Hart, L·M·Wenzel, "Real—Time Hybrid Computer Simulation of a Small Turbo-shaft Engine and Control System", *NASA—TM—83579*, 1984.
- [4] 翁史烈, 张伯年, 倪丽萍《燃气轮机性能的实时混合仿真》, 上海交通大学。
- [5] 翁史烈主编《燃气轮机》, 上海交通大学船舶涡轮机教研室, 一九八四年二月第二版。
- [6] J·R·Ketchum and R·T·Craig, "Simulation of Linearized Dynamics of Gas-Turbine Engines" *NASA TM—2826*, 1952.
- [7] F·Teren, "Minimum Time Acceleration of Aircraft Turbofan Engines by Using an Algorithm Based on Nonlinear Programming", *NASA TM—73741*, 1977.
- [8] *LM2500船用燃气轮机技术手册*。

## RFAL-TIME HYBRID SIMULATION OF THE DYNAMIC PROCESS OF SPLIT SHAFT MARINE GAS TURBINES

Weng Shilie, Su Ming and Zhang Bainian  
(Shanghai Jiaotong University)

### Abstract

By using an analytic method consisting in resolving an engine dynamic system into two subsystems, i.e. one, directly time-related and another, time-independent, the authors have made an exploratory study on the feasibility of performing a real-time simulation of the engine dynamic process, and proposed a method for the real-time simulation of the dynamic process of split shaft marine gas turbines. By use of the said method a real-time simulation of the speed reducing and increasing process of a split shaft marine gas turbine has been conducted on a simulating machine. The results obtained are in full agreement with those of a numerical simulation method.

**Key words:** gas turbines, real-time simulation, hybrid simulation.