

# 双转子涡轮喷气发动机转速 控制系统数字仿真

西北工业大学 樊思齐

## 一、发动机转速控制系统结构图

在对实际控制系统深入分析的基础上, 根据发动机基本方程和部件特性以及控制器的结构参数, 建立了该系统的静态数学模型和小偏差线性化的动态数学模型<sup>[1]</sup>。经变换后, 该模型的结构图如图1所示。图中 $\bar{a}$ —控制作用的相对变化量;  $\bar{N}_1$ 、 $\bar{N}_2$ —分别为发动机低、高压转子转速的相对变化量。

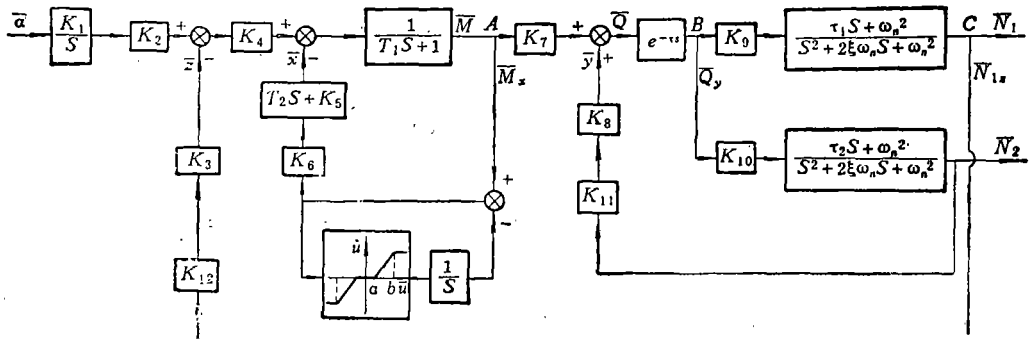


图1 发动机转速控制系统结构图

## 二、数字仿真方法

图1所示的系统包括有三个反馈回路, 其中一个内回路带有典型的非线性环节和微分环节, 对这样一个多回路控制系统采用离散相似法进行仿真使计算变得简单。为提高计算精度在连续系统离散化处理时采用三角形保持器。

连续系统的状态方程为

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

其离散解为

$$X[(k+1)T] = \Phi(T)X(kT) + \Phi_m(T)U(kT) + \hat{\Phi}_m(T)\dot{U}(kT) \quad (2)$$

1985年3月10日收到。

对系统各典型环节进行离散化处理, 可导出各环节相应的系数  $\Phi(T)$ 、 $\Phi_m(T)$ 、 $\hat{\Phi}_m(T)$  以及相应的递归方程<sup>[3,11]</sup>。

根据递归方程对回路迭代计算时, 一般常用输出量的前一步计算结果作为当前的反馈值进行迭代, 这必然导致计算误差, 回路越多, 计算误差越大。为解决此问题, 采用了反馈量进行预估值, 取回路中任意一点为平衡检验点迭代计算的方法。

对于图 1, 取  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为第一回路、第二回路和外回路的平衡检验点, 建立相应的误差方程。若相应各回路的反馈量的相对值分别为  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ , 给出  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  以预估值, 可得到相应的三个误差方程。

对第一回路

$$\begin{aligned}\bar{M} &= f_1(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \\ \bar{M}_x &= f_2(\bar{x}) \\ \bar{M}_{er} &= \frac{\bar{M} - \bar{M}_x}{\bar{M}} = \frac{f_1(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) - f_2(\bar{x})}{f_1(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})} = P(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})\end{aligned}\quad (3)$$

其中  $\bar{M}$ 、 $\bar{M}_x$  为随动机位移的相对变化量;  $\bar{M}_{er}$  为其变化量的相对误差。

对第二回路

$$\begin{aligned}\bar{Q} &= f_3(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \\ \bar{Q}_y &= f_4(\bar{y}) \\ \bar{Q}_{er} &= \frac{\bar{Q} - \bar{Q}_y}{\bar{Q}} = \frac{f_3(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) - f_4(\bar{y})}{f_3(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})} = R(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})\end{aligned}\quad (4)$$

其中  $\bar{Q}$ 、 $\bar{Q}_y$  为控制器输出油量的相对变化量;  $\bar{Q}_{er}$  为其变化量的相对误差。

对外回路

$$\begin{aligned}\bar{N}_1 &= f_5(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \\ \bar{N}_{1s} &= f_6(\bar{z}) \\ \bar{N}_{1er} &= \frac{\bar{N}_1 - \bar{N}_{1s}}{\bar{N}_1} = \frac{f_5(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) - f_6(\bar{z})}{f_5(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})} = S(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})\end{aligned}\quad (5)$$

方程 (3)、(4)、(5) 把求解差分方程问题转化为求根的问题。根据  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  的预估值, 由内回路到外回路迭代计算, 当第一次迭代不满足要求时, 由求根子程序<sup>[1,8]</sup>自动给出更接近方程根的新的  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  值, 继续迭代, 直到满足给定的误差  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ , 即  $P(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq \varepsilon_1$ ,  $R(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq \varepsilon_2$ ,  $S(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq \varepsilon_3$ 。

在程序运行时, 由于用抛物线法搜索求根, 每一点计算一般只需要迭代 6~8 次即可收敛。

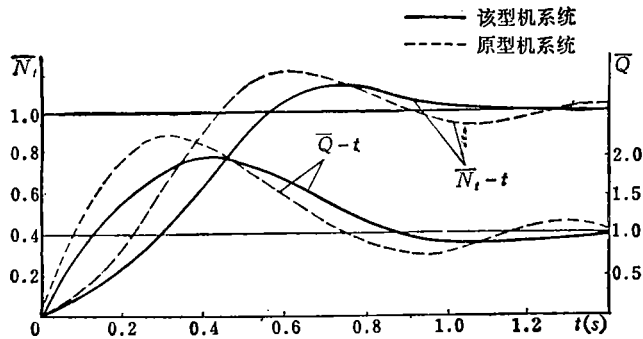
在静态计算中, 根据静态数学模型采用了同样迭代求根的方法<sup>[1]</sup>。

### 三、算例及仿真结果

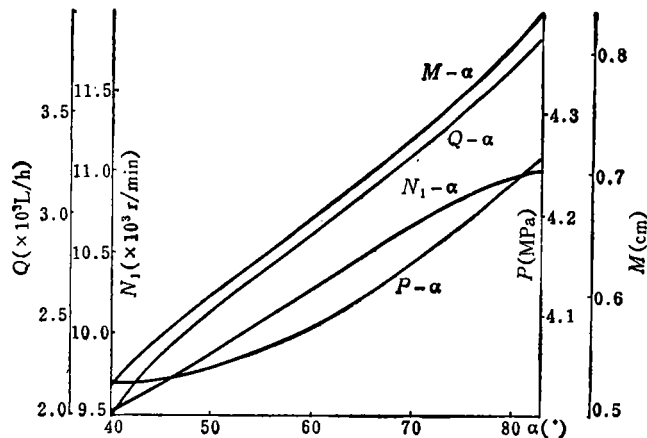
在  $H=0$ 、 $V=0$  和标准大气条件下, 程序给出了如下结果。

1. 当控制作用  $\bar{\alpha}$  有一单位阶跃变化时, 发动机转速、控制器输出油量、转速测量元件位移和随动机位移的时间响应, 其中发动机低压转子转速  $\bar{N}_1$  及控制器输出油量  $\bar{Q}$  的变化规律示于图 2。

计算时各回路的相对误差  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  取为  $5 \times 10^{-4}$ 。

图 2  $\bar{N}_1$  及  $\bar{Q}$  的时间响应曲线

2. 静态特性计算子程序<sup>[1]</sup>给出了当控制作用  $\alpha$  由  $40^\circ$  (相当于发动机自动控制开始) 到  $83^\circ$  (相当于发动机最大工作状态) 各不同点上, 发动机转速  $N_1$ 、控制器输出油量  $Q$ 、油泵后油压  $P$ 、随动机位置  $M$  以及转速测量元件位置和随动机输出力等物理量的变化规律。其中部分物理量的变化规律示于图 3。

图 3  $N_1$ 、 $Q$ 、 $P$ 、 $M$  随  $\alpha$  变化的规律

仿真结果表明, 该系统由于结构上的改进使系统性能与原系统比较有一定的提高, 例如由于控制器反馈套筒型孔的改进, 使非线性环节的线性段斜率减小, 即  $ab$  段尺寸适当的加大 (见图 1), 系统的动态性能得到改善, 仿真结果证明了这一点 (见图 2)。

又如, 由于控制器分布器型孔的改进, 使控制器输出油量在较大范围内变化时, 泵后油压变化不大, 这就使得油泵负荷降低, 寿命提高。

### 参 考 文 献

- [1] 樊思齐, 离散相似法在发动机非线性控制系统数字仿真中的应用及计算机程序, 中国航空学会动力专业自动控制年会论文1984, 10。
- [2] Smith, J. M., Mathematical Modeling and Digital Simulation for Engineers and Scientists, 1977, pp. 194~223.

- [3] Seller, J. F. and Daniele, C. J. DYNGEN a Program for Calculation Steady-State and Transient Performance of Turbojet and Turbofan Engines, NASA TN, D-7901, 1975 pp142~153, pp25~27.

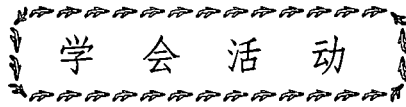
## MATHEMATICAL MODEL AND DIGITAL SIMULATION FOR SPEED CONTROL SYSTEM OF TWO-SPOOL TURBOJET ENGINE

*Fan Siqi*

*(Northwestern Polytechnical University)*

### Abstract

A mathematical model for the speed control system of two-spool turbojet engine is derived from component characteristics of the engine and construction parameters of the controller. The discretization-similitude method is adopted in the digital simulation of the nonlinear control system. The computer program written gives the steady-state and dynamic characteristics of the control system at  $H=0$ ,  $V=0$  and in standard atmosphere conditions. It is indicated that the performances of the control system are improved in comparison with its prototype.



### 中国航空学会召开春节座谈会

1986年2月3日下午,中国航空学会在北京民族文化宫召开了虎年春节座谈会,有全国科协、国防科委、空军、海军、民航、航天工业部、航空工业部的领导、专家、科技人员一百多人出席。由学会副理事长段子俊主持,王南寿秘书长报告了航空学会1985年工作总结和1986年工作计划。会上全国科协裴丽生、国防科工委叶正大、空军王定烈、航空工业部何文治、航天工业部庄逢甘、民航总局管德等领导同志讲了话,集中地谈到发展我国民用航空事业,首先在决策和方向上要研究和论证清楚;希望集中学会的智力资源,为发展我国航空事业做出贡献。最近受到中央领导同志接见的航空工业部十人代表徐培麟总工程师在会上介绍了中央对发展军民结合的国防工业的方针;《航空学报》主编何庆芝教授、《航空知识》谢础同志、空军姚峻同志都在会议上发了言。

座谈会开得生动活泼,体现了广大科技工作者对我国发展航空事业的关心和支持。

(广 京)