

气压缓冲器非线性数学模型辨识^{*}

于达仁¹, 阎志刚¹, 鲍文¹, 史新兴², 何保成²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 航天机电集团公司 31 所, 北京 100074)

摘要: 为了求得某涡喷发动机中气压缓冲器的高精度数学模型, 利用机理建模的方法, 建立了气压缓冲器非线性数学模型的基本结构, 用模型辨识方法得到了模型的参数。通过时域仿真与实测结果的比较, 证明非线性模型的最大误差比线性模型的小 3 倍。

关键词: 涡轮喷气发动机; 发动机燃料系统; 流量调节器; 缓冲器; 非线性; 数学模型

中图分类号: V233.24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)04-0044-03

Identification of nonlinear mathematic model of Air pressure buffer

YU Da-ren¹, YAN Zhi-gang¹, BAO Wen¹, SHI Xin-xing², HE Bao-cheng²

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;

2. The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: A way to establish a high precision model of an air pressure buffer in a turbo jet was introduced. It contains two phases: firstly to derive the nonlinear model structure based on the physical mechanism of the buffer, secondly to identify the parameters of the nonlinear model from test data. Through comparisons of the simulation results and the field test results, it is shown that the maximum error of the nonlinear model is about a third of that of the linear model.

Key words: Turbojet engine; Engine fuel system; Flow regulator; Snubber; Nonlinearity; Mathematical model

1 引言

某涡喷发动机在供油调节系统的控制下完成启动、加速过程, 并达到巡航状态正常工作。压气机出口压力 p_2 通过气压缓冲器引入到供油调节系统中, p_2 变化时, 经过缓冲后的压力 p_2' 随之变化, 供油调节系统根据 p_2' 调节发动机的工作状态。气压缓冲器如图 1 所示, G 为节流孔, R 为蓄气器。图 2 是某次飞行试验采样得到的 p_2 和 p_2' , 在 5.5 s 处由于发动机点火, p_2 出现突变; 气压缓冲器的整体特性近似为一个惯性环节, 具有低通滤波作用, 过滤掉了发动机中由于各种原因产生的高频脉动信号, 减小了对供油调节系统的干扰。气压缓冲器的动态特性将直接影响到发动机的加速时间和最大油气比, 合理选择气压缓冲器的参数对发动机的正常工作是十分重要的。

建立气压缓冲器的数学模型不仅对分析气压缓冲器与调节加速过程的关系有重要的意义, 而且对

研究气压缓冲器参数的合理选取, 发生故障时的诊断和分析都是十分重要的。本文的主要目的就是在机理建模的基础上, 建立气压缓冲器的模型结构, 然后用非线性模型辨识方法, 辨识出模型的参数, 使其能够准确描述气压缓冲器的特性。

2 气压缓冲器的数学模型

2.1 节流孔 G 的数学模型

G 是直径 0.8 mm 的节流小孔, 压差不同时 G 孔中气体的流动状态不同, 压差较小时处于层流状态, 这时流量与压差成式 (1) 所示的线性关系; 压差较大时处于湍流状态, 此时流量公式如式 (2) 所示。注意, 这里的流量指质量流量。

$$G_1 = K_1 \rho (p_2 - p_2') \quad (1)$$

$$G_1 = K_2 \sqrt{\rho (p_2 - p_2')} \quad (2)$$

在实际过程中, 可以认为任一时刻的流动处于两种

* 收稿日期: 1999-06-25; 修订日期: 2000-01-11。

作者简介: 于达仁 (1966—), 男, 教授, 博导, 研究领域为动力机械自动控制、故障诊断。

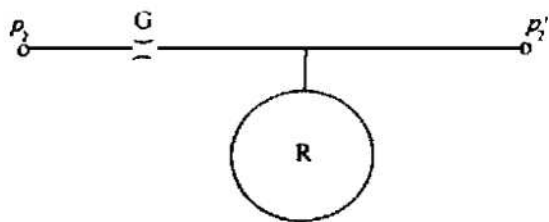


Fig. 1 Air pressure buffer

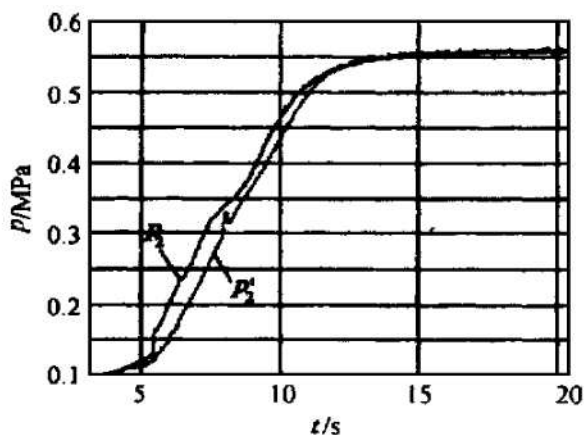


Fig. 2 Test results of p_2 and p_2'

流动状态之一。从图 2 可以看出，在发动机的启动加速过程中，初始段和末尾段 G 孔前后的压差比较小，而加速过程中间一段 G 孔前后的压差比较大。因此存在一个压力差 p_K ，当 G 孔前后的压差小于 p_K 时，G 孔中的流动处于层流状态，应用公式 (1) 计算；当 G 孔前后的压力差大于 p_K 时，就认为 G 孔中的流动处于湍流状态，应用公式 (2)。在 G 孔中两种流动状态切换点处，层流流量应等于湍流流量，因此依据公式 (1) 和 (2)，当 K_1 和 K_2 确定后，这个压差 p_K 就随之确定了。由于启动加速过程中压气机出口压力变化范围较大，流量公式中考虑了密度变化，计算表明这是十分必要的。

2.2 蓄气器数学模型

蓄气器的流量方程如公式 (3) 所示。

$$G_R = V_R \frac{d\rho}{dt} \quad (3)$$

其中， G_R 是蓄气器出口处的流量， V_R 是蓄气器容积， ρ 是气体的密度。

将蓄气器 R 中的气体看作理想气体，由理想气体状态方程，可得

$$G_R = \frac{V_R}{RT} \frac{dp_2}{dt} \quad (4)$$

由于蓄气器到供油调节系统装置一段的管路细长，可以认为供油调节系统只感受压力变化，这一段管

路中没有流量，因此有

$$G_1 = G_R \quad (5)$$

需要说明的是，以上的方程中的 T 采用绝对温度，而气压缓冲器中气体的温度变化范围不大，因此将气压缓冲器气体温度作为常数处理。

对于理想气体，根据气体方程，有

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (6)$$

由此，根据公式 (1) ~ (6)，就可以得到气压缓冲器的数学模型的框架。

3 气压缓冲器数学模型辨识

上面得到了气压缓冲器数学模型的基本结构。但是，将公式 (1) ~ (6) 直接应用于仿真计算还有一定的困难。受到一些复杂因素的影响，在式 (1) 和 (2) 中的参数 K_1 和 K_2 难以精确计算，如何合理地确定 K_1 、 K_2 值是在进行仿真计算前必须解决的问题。

在试车过程中，采样得到了气压缓冲器的输入及输出信号，因而可以在此基础上对气压缓冲器的数学模型进行辨识。

3.1 气压缓冲器模型辨识算法

为了辨识出气压缓冲器的数学模型，合理的确定 K_1 、 K_2 值，需要先构造一个目标函数，将 K_1 、 K_2 作为自变量，通过优化，得到 K_1 、 K_2 的最优解，使目标函数达到最小值。

通过这样的转化，就将模型辨识问题转化为一个最小二乘问题

$$\min F(x) = \sum_{i=1}^m (\hat{y}(x, t_i) - y(t_i))^2 \quad (7)$$

其中， $F(x)$ 是目标函数， $\hat{y}(x, t_i)$ 是使用参数 x 计算出的 t_i 时刻的计算值， $y(t_i)$ 是 t_i 时刻的采样值。 x 可以是标量，也可以是向量或矩阵。在这个问题中， x 是一个由欲辨识的参数构成的向量。对于这样的最小二乘问题，有标准的算法可以利用，本文采用的是拟牛顿法^[1,2]。

3.2 辨识结果及相应分析

按照上述算法进行了气压缓冲器数学模型的辨识。利用辨识得到的参数进行了时域仿真，其结果如图 3 所示。其中曲线“1”表示实测得到的 p_2 ，曲线“2”是计算得到的 p_2' 。从图 3 可以看出，辨识得到的模型比较准确的描述了气压缓冲器的特性，时域仿真计算得到 p_2 与实测得到的 p_2 吻合的非常

好。

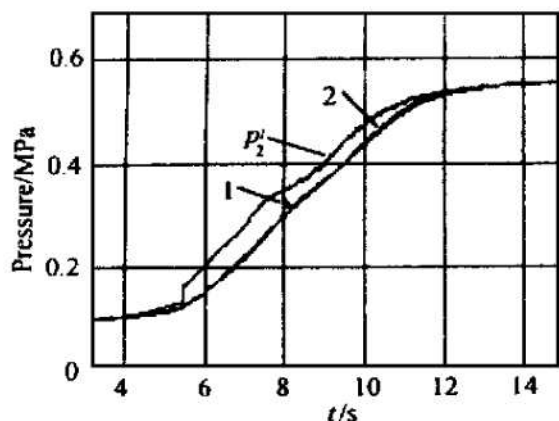


Fig. 3 Comparison of simulation and test results

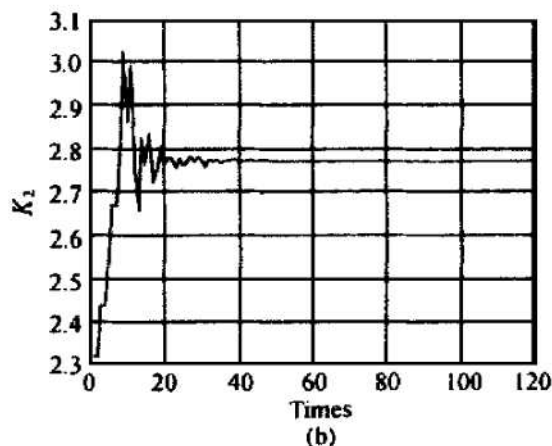
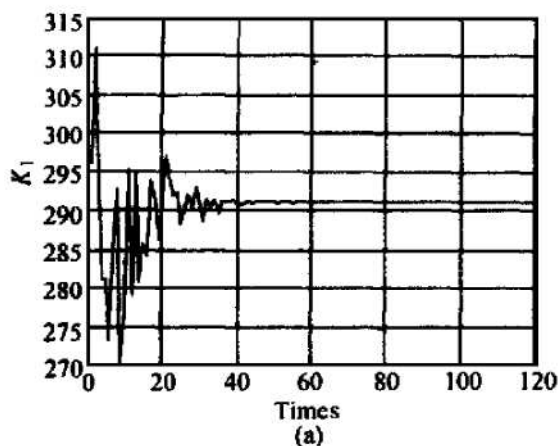


Fig. 4 The convergence process of K_1 and K_2 along with the calculation steps

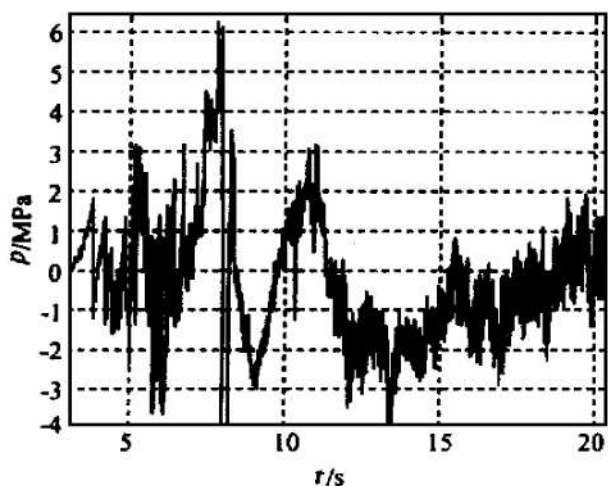


Fig. 5 The residual of identification results

从图 2 和图 3 还可以看出, 在加速段的初始时刻和末尾阶段, 气压缓冲器前后的压差很小, G 孔中的流动处于层流状态, 而在加速过程中, 气压差比较大, G 孔中的流动处于湍流状态。单独应用一种流态来描述和计算 G 孔中的节流作用都是不准确的, 这一点可以通过仿真来进行验证。单独应用层流模型进行计算时, 得到的是线性模型, 同样通过

通过对辨识过程的跟踪, 得到了在辨识过程中参数 K_1 和 K_2 的收敛过程, 如图 4 (a) 和图 4 (b) 所示。从图中可以看到, 经过 40 次左右的迭代运算后, K_1 和 K_2 收敛于一个稳定值, 这说明算法的稳定性很好, 因此初值可以在比较大的范围内选取, 当然初值选取的越接近最优解, 计算的收敛速度就越快。辨识得到的残差如图 5 所示, 从图上看, 得到的结果接近于白噪声, 计算结果与实际测量结果间的最大误差在 0.006 MPa 左右。为了验证辨识结果, 计算了残差的自相关函数, 从计算结果可以看出, 残差接近于白噪声, 这说明辨识的结果还是比较理想的。

辨识得到模型参数, 仿真计算得到残差的最大值在 0.02 MPa。类似的, 单独应用湍流模型计算时, 得到残差的最大值也达 0.02 MPa, 明显要高于采用非线性模型时的最大误差。

4 结 论

本文分析了某涡喷发动机中气压缓冲器的重要作用, 利用机理建模的方法得到气压缓冲器非线性模型的基本框架, 然后利用非线性模型辨识方法, 构造出指标函数, 辨识得到非线性数学模型的结构参数。通过仿真验证, 这种方法切实可行且具有较高精度。

参 考 文 献

- [1] 蔡金狮. 动力学系统辨识与建模 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [2] 蔡金狮. 飞行器系统辨识 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.

(责任编辑: 史亚红)