

系统辨识在变推力火箭 发动机系统建模中的应用

王克昌

摘 要

本文根据国外关于系统辨识的基本方法,结合国内BYF发动机实验数据,利用不同辨识计算方法对BYF发动机进行了模型及参数辨识,并取得了满意的结果。结果表明,发动机系统的辨识研究十分重要,它可以提高建立数学模型的准确性和效率,并为自校正控制的实现奠定了基础。

一、引 言

液体火箭发动机系统是个复杂的系统。人们一直十分重视其静态特性、动态特性的研究。而近几年来,用系统分析的方法分析发动机系统的动态性能日益受到普遍的重视。国内外已有不少人相继进行了大量工作。文献(1)中详细地叙述了根据发动机系统内在的物理、化学规律,通过一定的假设,直接推出了BYF发动机系统的数学模型,并得出了一些对研制工作有价值的结论。其系统工作原理及控制系统方块图如图1,图2所示。

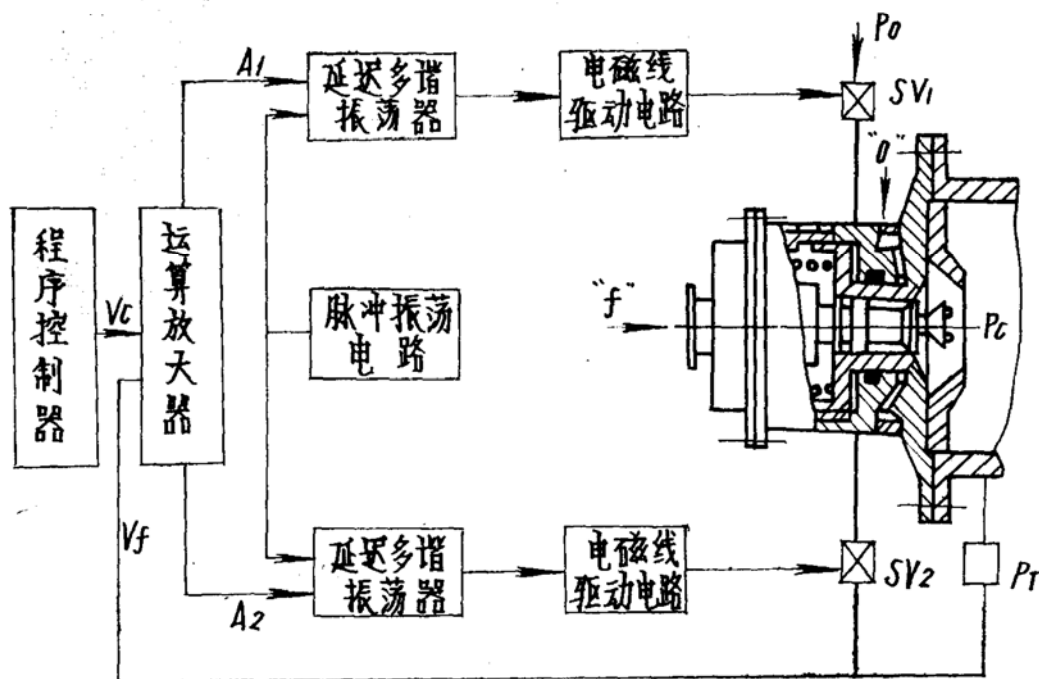


图1 变推力控制系统工作原理图

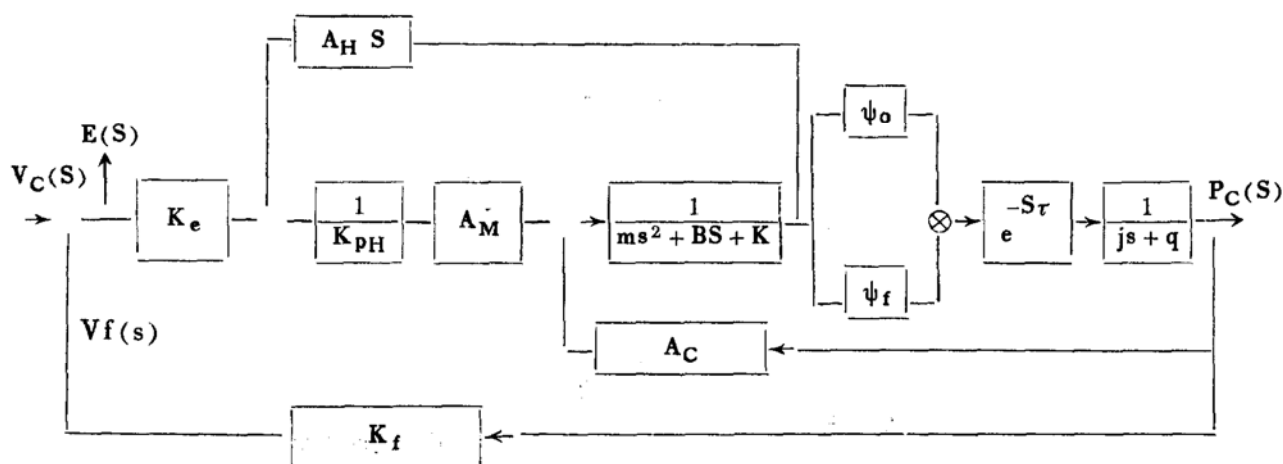


图2 控制系统方块图

据此可列出系统诸元件的环节方程并在额定值附近进行线性化, 最后得到整个系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_e K_c \frac{A_H}{K_{PH}}}{ms^2 + \left(B + \frac{A_H^2}{K_{PH}} \right) s + K - K_c A_c + K_e K_c K_f \frac{A_H}{K_{PH}}} \quad (1)$$

式中 m ——喷注器针阀质量 A_H ——控制腔作动面积
 K_e ——电磁阀流量增益系数 K_{PH} ——控制腔压力影响系数
 K_c ——喷注器增益系数 B ——针阀运动阻尼系数
 K_f ——反馈传感器放大系数 K ——喷注器弹簧刚度。

上述研究与大量的试验数据仔细比较后, 可以发现该模型与实验结果一致性欠佳。特别是不能解释BYF发动机系统的不同推力值时 P_c 过渡过程的明显差异。这表明, 文献〔1〕中建立的数学模型(由于推导过程中的若干假设以及若干参数的选取上欠妥)有一定的局限性。从而不能真实地模拟发动机系统的动态性能。

众所周知, 随着现代控制理论的飞速发展以及电子计算机的广泛使用, 使得利用观察(试验)数据建立模型的方法——系统辨识日益受到人们的高度重视。利用它可以迅速地、准确地建立发动机系统的数学模型, 这种模型能正确地反映系统的实时状态, 从而为今后的发动机实时控制提供了极为重要的条件。为此, 目前已着手进行变推力火箭发动机系统的辨识工作。

二、系统辨识方法简述

十几年来, 系统辨识作为现代控制理论的一个重要分支有了重大进展。提出了各种各样的算法。而且在各个领域都有广泛的应用。

简单地说, 系统辨识就是利用系统的试验(或运行)数据构造系统的数学模型和估计参数的理论和方法。也就是说, 对实际系统进行试验和观测, 分析观察到的输入和输出数据, 建立一个数学模型, 并根据一定的准则, 使该数学模型所代表的系统尽可能等价于所观察的系统。系统辨识的方块图如图3所示。

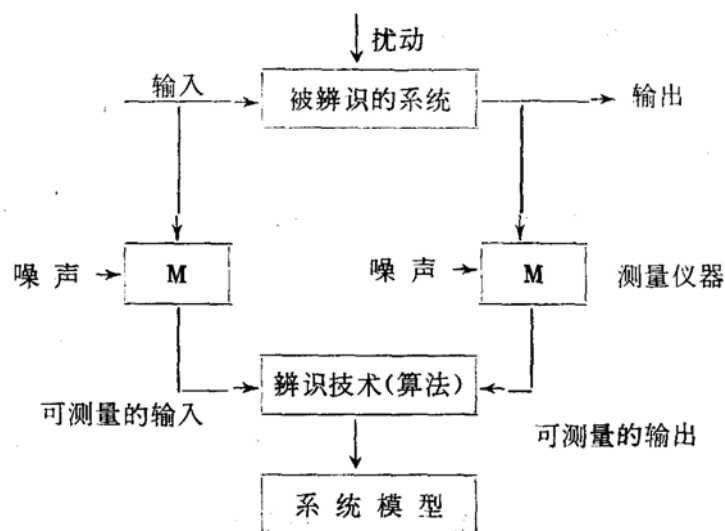


图3 系统辨识问题的方块图

根据文献〔2〕提供的基本方法，结合我们研制BYF发动机系统的试验数据。我们用各种辨识算法对BYF发动机系统进行了模型及参数辨识。所采用的方法如图4所示。

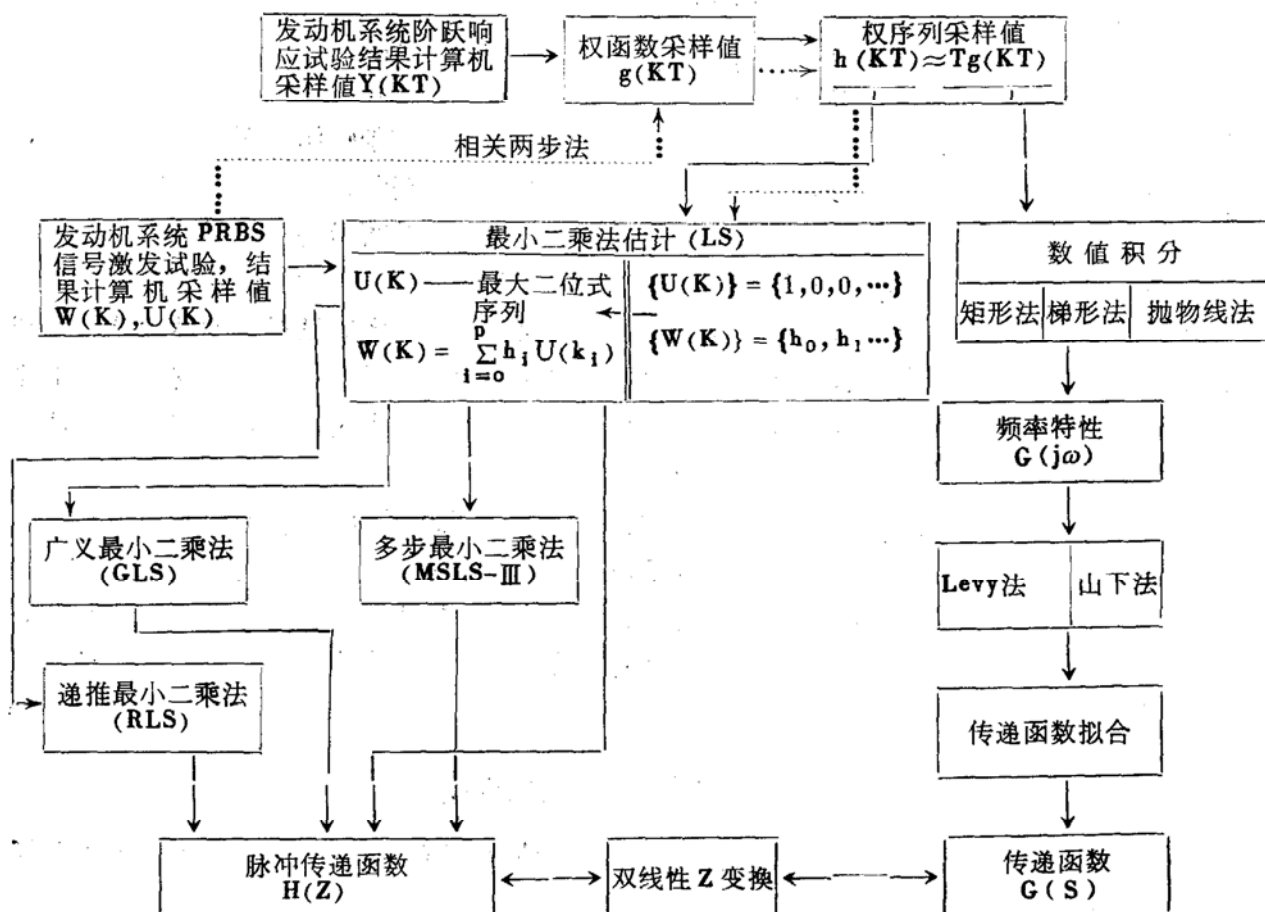


图4 BYF系列发动机系统辨识方法框图

图4中所列各种方法的计算公式可从文献〔3〕中查得。

根据BYF发动机系统目前所能得到的试验数据，辨识工作可从两条路线来进行。

1. 利用BYF发动机系统的常规热试车数据

在BYF发动机系统中, 每一次推力的调节均是递增地增加 1 伏控制电压, 那么, 其燃烧室压力的变化曲线就相当于一个阶跃响应曲线。这个阶跃响应曲线在试验时可以通过两种手段获取。通常是采用 16 线示波器进行记录, 然后进行人工采集。另一个手段是通过 TRS-80 微处理系统直接采集 P_c 的数据, 从而形成采样值 $P_c(K\Delta T)$ 。

从自动控制理论可知: 在单位脉冲信号作用下系统的输出 $g(t)$ 是单位阶跃信号作用于系统的输出 $h(t)$ 的导数, 即:

$$g(t) = \frac{d}{dt} h(t) \quad (2)$$

若 $h(t)$ 到 $t = T$ 时才稳定, 则按照香农(Shannon)采样定理, 可以把 $(0 \sim T)$ 这段时间分成 N 等分。其对应的阶跃响应曲线的值为 $h(t_i)$, $i = 0, 1, \dots, N$ 。

$$N \geq \frac{\omega_n T}{\pi} \quad \omega_n \text{——为系统最大的工作角频率。}$$

$$\Delta T = t_{i+1} - t_i = \frac{T}{N} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

采取二点差分作其中点处的导数值, 则 (2) 式可写成离散形式。

$$g(t_i) = \frac{h(t_{i+1}) - h(t_{i-1}))}{2\Delta T} \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (3)$$

而其两端的值可分别取为

$$g(t_0) = \frac{h(t_1) - h(t_0)}{\Delta T}, \quad g(t_n) = 0 \quad (4)$$

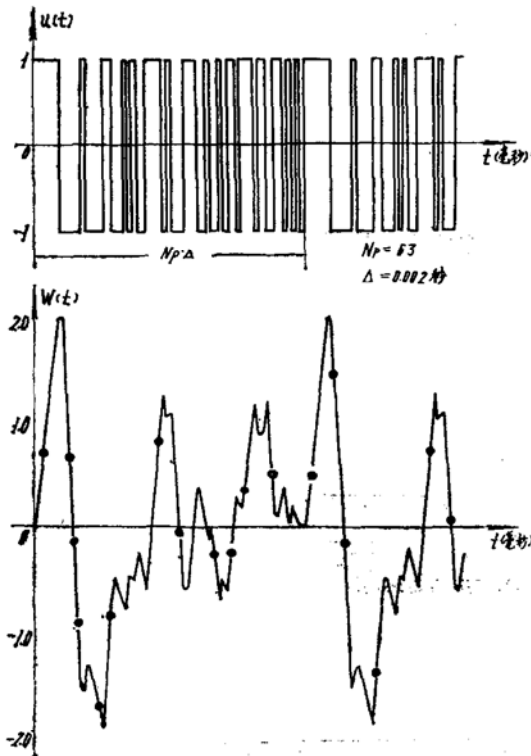


图5 PRBS信激励系统的输入输出信号

这样一来, 我们就得到了系统的权函数 $g(t)$ 的采样值 $g(K\Delta T)$, 此处 ΔT 为采样周期。

有了 $g(t)$ 就可通过傅氏积分求得频率特性 $G(j\omega)$, 然后可分别用 Levy 法和山下法拟合出 BYF 发动机系统的传递函数 $G(S)$ 。同样从 $g(t)$ 可以用最小二乘估计, 广义最小二乘法, 多步最小二乘法等时域方法求得 BYF 发动机系统的脉冲传递函数 $H(Z)$ 。经过双线性变换后就可求得系统的传递函数。

2. 在发动机试验时, 直接给发动机系统施加一个由伪随机信号发生器产生的, 接近白噪声信号的伪随机二位式序列 (PRBS)。来激励 BYF 发动机系统。并采集输入输出信息。

这种 PRBS 信号是一个周期性序列。在它激励下, 可测得燃烧室压力 P_c 的响应序列。其典型数据如图 5 所示。而一旦有了 $U(K)$, $W(K)$ 序列后, 就可直接用各种时域方法进行模

型的辨识计算。

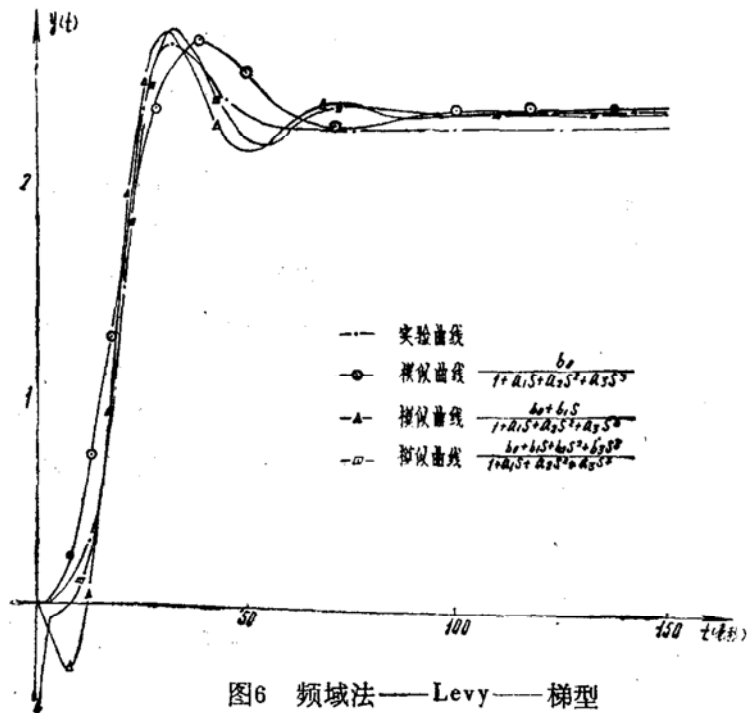
3. 辨识计算分析

现将用各种常用的辨识方法对BYF发动机系统进行辨识计算的结果分别以表和曲线列于表1和图6,7,8,9,10中。

表1 各种辨识方法结果——参数估值比较(二阶模型)

辨识方法 \ 参数	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_1	c_2
Levy法(矩形)	0.8140 E-2	0.6484 E-4	2.200	-0.1419 E-1	0.3792 E-4	—	—
Levy法(梯形)	0.8444 E-2	0.644 E-4	2.270	-0.1408 E-1	0.4042 E-4	—	—
山下法(梯形)	0.77432 E-2	0.606 E-4	2.272	-0.1491 E-1	0.692 E-4	—	—
最小二乘法(LS) (方法1)	0.7407 E-2	0.1519 E-4	2.264	-0.8899 E-3	-0.1373 E-5	—	—
最小二乘法(LS) (方法2)	0.7227 E-2	0.1735 E-4	2.249	-0.5404 E-3	-0.1579 E-5	—	—
广义最小二乘法 (GLS)	0.6338 E-2	0.2114 E-4	2.1554	-0.4504 E-3	-0.2068 E-4	0.2557 E-2	-0.1670 E-2
递推最小二乘法 (RLS)	0.7364 E-2	0.1703 E-4	2.330	-0.6898 E-3	-0.1509 E-5		
多步最小二乘法 (MSLS-III)	0.2478 E-1	0.1290 E-4	2.224	-0.1610 E-2	-0.2621 E-5	0.3245	0.1112 E-2

(注): C_i 值是离散型噪声模型参数



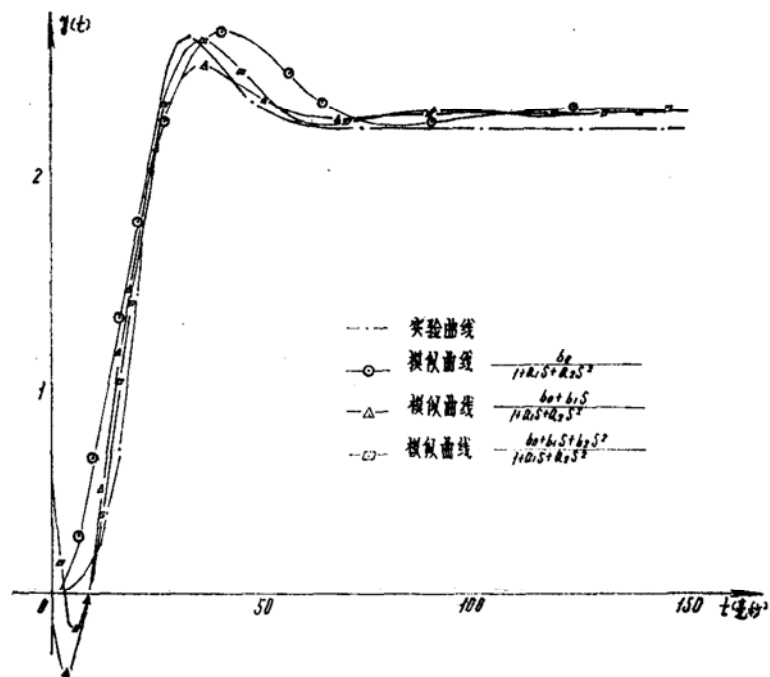


图7 频域法——Levy——梯型

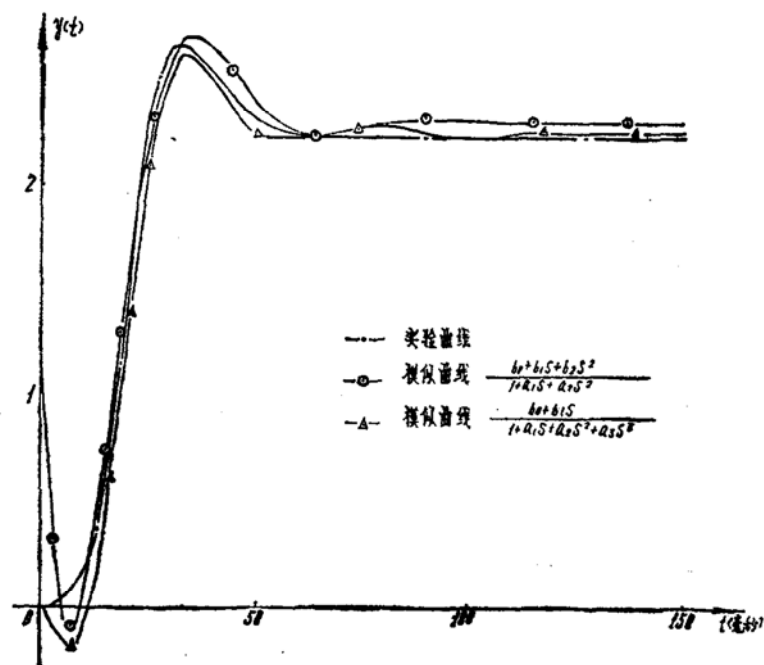


图8 频域法——山下——梯型

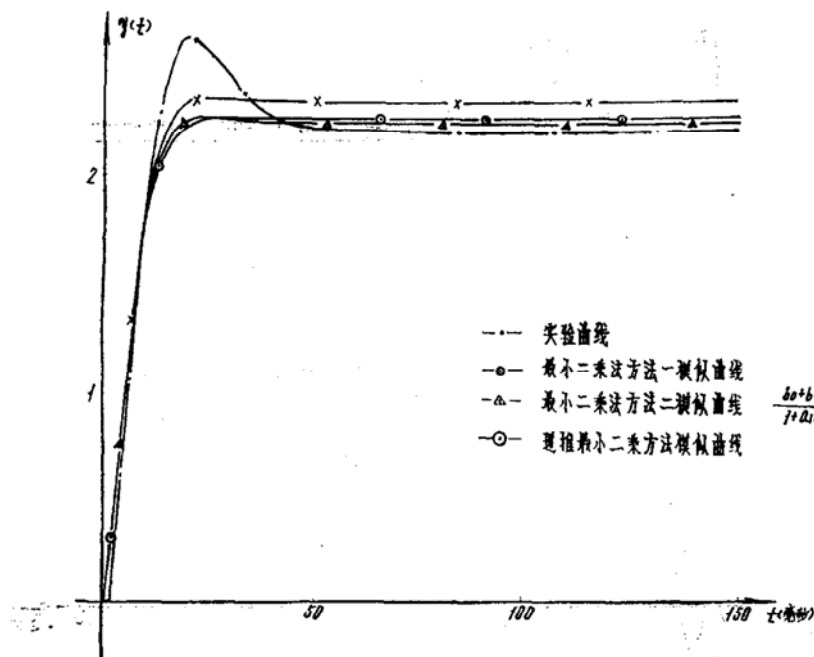


图9 时域法-1

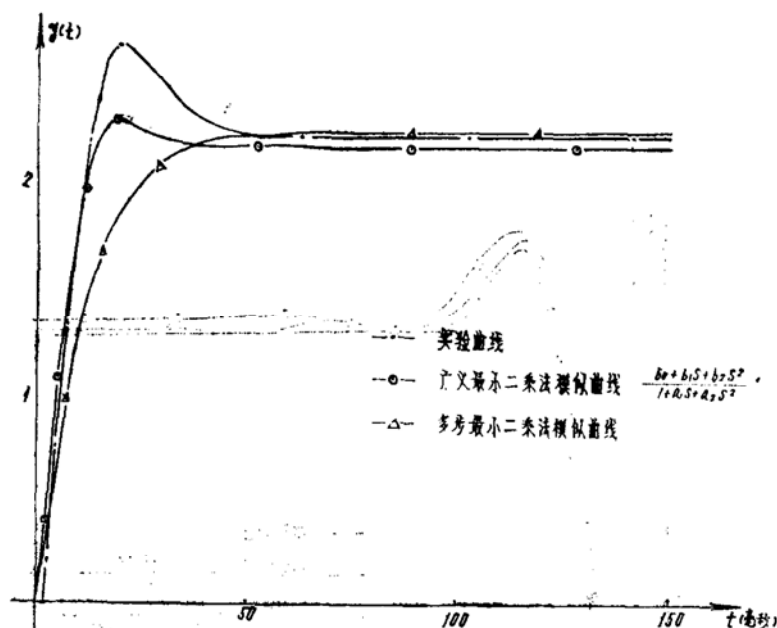


图10 时域法-2

由所列的曲线和表 1 所列数据可以看出:

(1) 无论频域法还是时域法都能取得较好的辨识结果。其中频域法在经过适当调整频率取样后就可使结果满意。开始是在 $0 \sim 600$ 范围内按十倍频段分段, 每段间等差采样来拟合的, 结果欠满意, 后来在低频段增加若干采样, 其结果则令人满意。

(2) 辨识结果的优劣主要决定于输入输出数据来源的可靠、准确。特别是时域方法辨识时对权序列 $\{h(KT)\}$ 的前几组要求更苛刻, 否则会使拟合结果不好。我们利用 $y(KT) \rightarrow g(KT) \rightarrow h(KT)$ 方案辨识时就遇到这个问题, 其根本原因是阶跃输入信号不标准, 致使响

应 $y(KT)$ 失真所造成。因此,今后应主要采用伪随二位式序列(PRBS)信号激励系统,进行辨识研究,这有利于保证数据的准确性。

(3) 时域法的计算时间要比频域法的计算时间少得多。因此,今后主要应研究时域法的辨识方法。

(4) 广义最小二乘法比最小二乘法更为有效,尤其当残差自相关时,它能提供更精确的估计,而且在辨识过程中,同时估计出一个合适的噪声模型。

(5) 递推最小二乘法是实施在线实时辨识的关键,它可以利用新的实验数据不断刷新,改进我们的参数估计应当给予重视。

五、结 语

发动机系统的辨识研究工作才刚刚开始,许多工作还是初步的。但是,结果已表明发动机系统的辨识研究是十分重要的,它可以提高建立数学模型的准确度和效率,而且为自校正控制的实现奠定了基础。因此,应当引起从事发动机系统设计、研究、分析的同志们的注意。

参 考 文 献

- (1) 周锡文:变推力火箭发动机控制系统调节性能分析。宇航学报, No 1, 1982年。
- (2) 熊光楞, 周蔚吾: IDENT—一个线性系统辨识的计算机辅助程序。信息与控制, No 6, 1983年。
- (3) (美)夏天长著,熊光楞,李芳云译:系统辨识——最小二乘法。清华大学出版社。