

变推力液体火箭发动机热试车 数据处理软件

杨乐平

(航天技术系)

摘要 本文介绍了一种用于变推力液体火箭发动机热试车数据现场分析处理的计算机软件。该软件集热试发动机静态和动态性能参数分析处理为一体,能够在热试现场迅速提供全部试验结果(包括数据和曲线),多次试验均取得了十分满意的结果。

关键词 数据计算,火箭发动机,推力,热试车

分类号 V343.3

符号说明

P_c ——燃烧室压强, α ——余氧系数, η_c ——燃烧效率, C_{Lc} ——实际特征速度, C_{Lc}^* ——理论特征速度, A_c ——喷管喉部面积, q_{mP} ——推进剂质量流量, V_c ——控制电压, V_f ——反馈信号电压, t_{p90} ——室压响应时间, t_{h90} ——位移响应时间。

热试车是液体火箭发动机研制过程中一个重要环节,也是检验和考核发动机性能水平,发现并解决设计和使用中存在问题的主要途径。在我国新一代可多次启动、双组元、双调节变推力液体火箭发动机研制过程中,我们对发动机进行了大量的热试车。过去发动机热试车数据的分析处理需分两步进行。在热试现场仅能给出发动机原始待测量的数字打印结果和光线示波器记录曲线,然后再经过试后大量的分析判断和计算,才能得到我们所需要的发动机全部静态和动态性能参数。处理周期长,工作量大,二次处理也易于引进人为误差。更重要的是,对变推力液体火箭发动机的热试车而言,其突出特点是发动机研制人员需根据热试发动机的实际性能参数,现场判断发动机系统是否处于正常调整状态,以便为系统参数调整和控制提供依据。显然,上述处理过程不能满足需要。为此,我们在逐步完善的基础上,研制开发了一套功能齐全的发动机热试车数据分析处理软件并将它投入实际运用,取得了十分显著的效益。

1 程序的总体设计

考虑到具体发动机的试验技术要求,程序主要由发动机静态和动态参数分析处理两

大部分组成，包括制表和绘制曲线等十几个子程序。为了用户使用方便，程序之间采用了批处理链接的方式。用户只需键入批处理文件名，按照屏幕上的菜单提示，即可一次性完成整个处理过程。对操作和数据读写错误，屏幕上给出错误提示和修正等待。

静态参数分析处理程序主要完成变推力液体火箭发动机每个工况燃烧室压强 P_c 、推进剂组元比 α 、燃烧效率 η_c^* 、真空推力 F_v 、真空比冲 I_{sv} 等发动机性能参数的处理和计算，最后将全部结果用参数表格的形式从打印机输出。

动态参数分析处理程序主要给出变推力发动机每个工况的 1/5 阶跃响应时间，并绘出每个工况过渡过程的动态响应曲线。

全部程序均采用编译 BASIC 语言编写。这主要是考虑到 BASIC 程序与汇编语言编写的采集程序交换数据显得十分方便，有丰富的人机对话和作图功能；同时，经过编译以后的执行文件具有速度快，省内存等特点。

2 静态参数分析处理程序

静态参数处理程序框图如图 1 所示。

程序执行后，首先通过人机对话的方式，输入环境大气压强，环境温度、试车时间和试车编号等现场参数，然后屏幕揭示是否修改已预置的各传感器标定系数。这些准备工作完成以后，程序运行并最终给出结果。

2.1 测量数据统计分析

为了消除测量数据中混有的随机误差和干扰噪声信号，保证结果的可靠性和合理性，在计算发动机性能参数之前，必须对采样值进行统计分析和处理。处理程序从 20 组采样值中取 5 次作算术平均，用 Grubbs 准则剔除异常值，即

$$\begin{cases} \bar{x} = \sum_{i=1}^5 x_i \\ \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \end{cases} \quad (1)$$

当 $|x_i - \bar{x}| \leq g_0 \sigma$ 时， x_i 保留；当 $|x_i - \bar{x}| > g_0 \sigma$ 时， x_i 剔除。

x 代表任意测量参数。 g_0 是与取平均值的次数和显著性水平有关的系数，可查表得。

2.2 燃烧效率计算

液体火箭发动机的燃烧模型是十分复杂的在推进剂组合、燃烧室压强 P_c 和推进剂余氧系数 α 确定的条件下，燃烧效率 η_c^* 由下式确定：

$$\eta_c^* = \frac{C_{ex}^*}{C_{ih}^*} \quad (2)$$

式中， $C_{ex}^* = \frac{P_c A_t}{q_{mp}}$ ，一般而言 $C_{ih}^* = f(P_c, \alpha)$

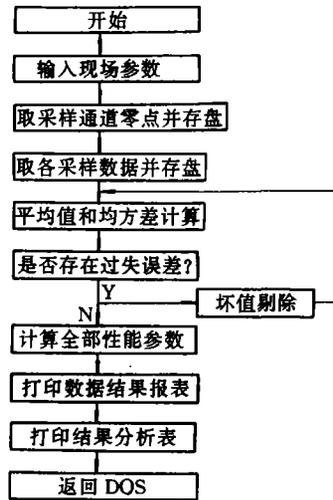


图 1 静态参数处理程序框图

(2)式的具体对应结果,必须经过复杂的推力室热力计算才能得到,但这将占用大量的CPU时间,不能满足现场处理的需要。为此在事先计算的基础上,处理程序应用了三阶样条函数插值的方法。这种插值不仅可以保证样点的函数值,还保证样点上具有一阶和二阶连续导数,从应用角度看已经相当“光滑”。

尽管(2)式中 P_c 对 C_{α} 的影响很弱, C_{α} 主要与 α 有关。但为了考虑 P_c 不同带来的细微差别,处理程序对5个不同 P_c 工况,设置了5个对应的插值子程序。计算各个工况的 C_{α} 只需调用相应的子程序即可。

至于制表程序,限于篇幅,这里不予详述,制表格式和规格可根据用户要求而定。

3 动态参数分析处理程序

程序框图如图2所示。动态参数 P_c 、 V_f 、 V_c 以5ms的采样时间进行采样。处理程序首先从内存中取出所有动态参数采样值,然后按控制电压 V_c ($=0.5V, 1.5V, 2.5V \dots$) 自动分档排序,并写入相应的二维数组。这样,数组元素的编号就确定了相应的动态参数对应的时刻。由此,将时间坐标下对应的动态参数采样值一一连接起来,就构成了动态响应曲线,以取代常规的光线示波器记录曲线。为了保证绘出的曲线尽可能高的分辨率,考虑到发动机各个工况的动态过程一般均在100ms内完成(起动过程除外),横坐标时间的取值从0到200ms,纵坐标取值范围视各个工况动态参数的具体幅值范围而定。除此之外,处理程序还能自动判读动态响应指标,并标注在响应曲线上。整个曲线可从打印机快速拷贝输出,十分便于分析判断。图3是某次热试车一个工况的输出结果。

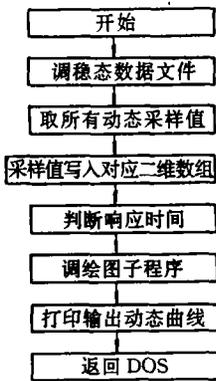


图2 动态参数处理程序框图

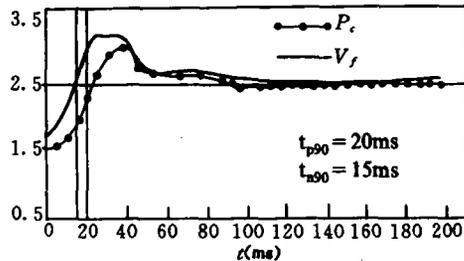


图3 某次热试车 $V_c=2.5V$ 工况响应曲线

4 结 论

经过一年多时间,超过1500s的实际热试车考核结果证明:该处理软件工作可靠,功能齐全。概括起来,主要有以下几个特点:

(1) 程序将计算机数据处理同火箭发动机性能分析有机结合,改变了以往测试与数据处理分开的工作方式,具有很强的实用性。

(2) 计算机图形处理和制表技术的应用,使得到的曲线和数值结果清晰直观,便于现场快速分析和判断。

(3) 程序将所有原始测量数据存入磁盘, 由此可建立发动机热试车数据库, 长期保存, 随用随调。

(4) 程序提供的交互式工作环境, 大大方便了用户的使用。

本软件适合于变推力火箭发动机或其它小型火箭发动机热试车数据处理, 对其它方面的数据处理也有参考价值。

在这套软件的研制和完善过程中, 得到 103 教研室诸多同志的关心和帮助, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 张福炎, 蒋新儿, 李滨宇. 微型计算机 IBM-PC 的原型与应用. 南京大学出版社, 1984
- 2 陈启智. 液体火箭发动机控制与动态特性理论(上册). 长沙: 国防科技大学一系, 1988
- 3 许隆文. 计算机绘图. 北京: 机械工业出版社, 1983. 234~367
- 4 刘惠彬, 刘玉刚. 测试技术. 北京航空航天大学出版社, 1989. 37~101

Introduction to the Data Processing of Throttling Rocket Engine Fire Test

Yang Leping

(Department of Aerospace Technology)

Abstract

This paper introduces the data processing program in the fire test of the throttling rocket engine. The program is capable of processing both static and dynamic performances of testing rocket engine, all the testing results (include data and plots) required can be provided in real-time. The extremely satisfactory results are obtained in a number of tests.

Key words data processing, rocket engine, throttling, fire test