

长寿命卫星姿控发动机测试系统

杨 正 毅

摘 要

本文介绍了以PC-8000微机系统为主体的应用于长寿命姿控发动机的测试系统,用以测量燃料及氧化剂贮箱压力、燃烧室压力、燃烧室压力上升和下降时间、脉冲点火冲量、质心旋转冲量、旋转质心、累积旋转冲量、燃料流量、发动机推力和温度等参数。该测试系统在试验中取得了满意效果并可推广到其他发动机。

主题词: 1.测试设备, 微调发动机 2.微调发动机-实时测量

一、前 言

长寿命卫星采用地面站同步指令遥控方案,即地面指挥中心与卫星组成控制回路。地面站根据卫星上遥测姿态参数,计算卫星初始姿态,再根据卫星初始姿态和已知的预定目标姿态计算出本次机动所须的累积旋转冲量 $\Sigma \Delta I$ 。如果发动机在各种工况下的性能参数已知,就可计算出所须工作的脉冲数 N 。地面站向卫星发出遥控指令,发动机脉冲工作 N 次后,把卫星调整到预定的姿态,这就组成大回路控制。

由于姿控发动机在卫星工作的各个不同阶段中,担负着卫星的起旋、加旋、姿态的建立、轨道修正以及姿态修正等不同的工作,要求测量与处理的参数较多,其中某些参数,例如旋转质心、累积旋转冲量等计算也较复杂。只有应用电子数字计算机才能完成实时的控制、测量和数据处理任务。我们在完成了“姿控发动机快速脉冲参数测量和计算机数据处理系统^[1]”和以Cromeco单板机为主体的“姿控执行机构的测控系统”^[2]的基础上,又以PC-8000微机系统为主体,研制了这套发动机测试系统。经几年来的使用,获得了满意的效果。我们应用该系统评价和测试姿控发动机的各种性能参数。这些参数有:燃料容器压力、发动机燃烧室压力、燃烧室压力建立时间、燃烧室压力下降时间、脉冲工作冲量、质心、旋转冲量、旋转质心、累积旋转冲量以及燃料流量、发动机推力和温度等。

二、系统的组成

系统由PC-8000微机系统、DAS-20多路数据采集器、前置放大器、滤波器、振子示波器、数字绘图仪、接口电路以及压力、推力、流量、温度传感器等组成(见图1)。

1. PC-8000微机系统包括PC-8001个人计算机(CPU为Z80)、PC-8011扩展单元、PC-8023点阵式打印机、PC-8031软盘驱动器、PC-8043彩色终端监视器构成。内存64K字节、2路RS-232C通信接口、8位和4位并行I/O口各一个。操作系统为CP/M 2.2。系统配有M80汇编程序,高级语言有N-BASIC以及在CP/M支持下的FORTRAN80, PASCAL80、COLOB80程序等。

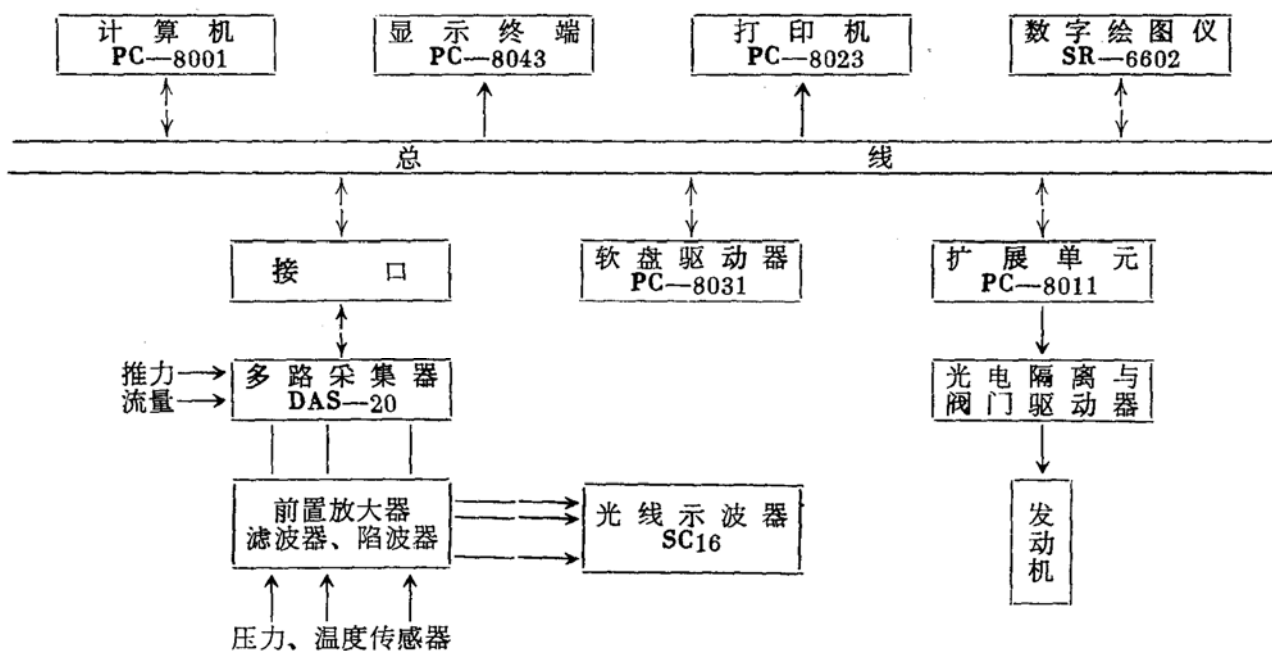


图1 测试系统框图

2. DAS-20多路数据采集器

该仪器为单端16路输入，输入电压范围是 $0 \sim \pm 5V$ ，12位编码，精度为0.2%，A/D转换频率为10kHz。

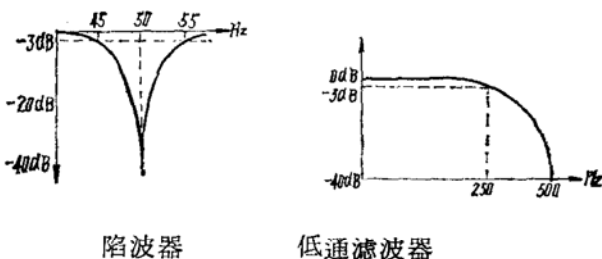


图2

3. 前置放大器、滤波器和陷波器

由于压力传感器和热电偶输出信号较小，不能满足DAS-20多路数据采集器满量程5V的要求，系统中使用了前置放大器，发动机试验是在高空模拟器中进行的，测试现场存在真空泵等大的用电设备，为克服现场干扰和长线传输

带来的干扰，我们在前置放大器后加进50周陷波器和低通滤波器，提高了测试系统抗干扰的能力，这两种滤波器的频率特性如图2所示。

4. I/O口与驱动电路

为对发动机阀门进行控制以及与其他设备进行同步工作，系统中使用了PC-8011的并行I/O口。其中并行输出口BOH用于发动机点火控制。并行输入口BIH用于查询其他设备的工作状态，以保持与其他设备工作的同步（见图3与图4）。

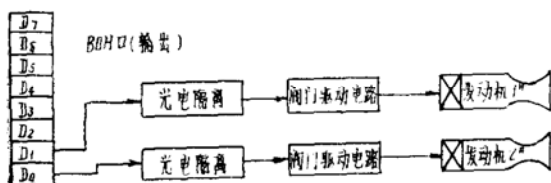


图3

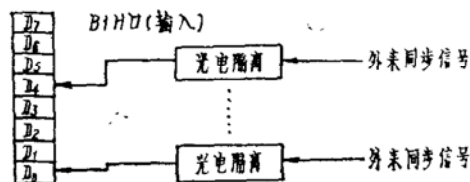


图4

DAS-20多路数据采集器是通过一片可编程并行I/O片8255与微机总线相连。使用口地址从8CH到8FH。8255设置为工作方式0，各口功能设置如下：

A口(8CH): 输入,接收A/D转换输出的高八位数据。

B口(8DH): 输出,用于控制DAS-20通道切换。

C口(8EH): 输入,D₄到D₇接收A/D转换输出的低4位数据。D₀是A/D转换状态标志位(E、O、C)。

8255编程控制口是8FH。

5. 光线记录示波器

考虑到过去测量方法的延续性,把来自传感器的模拟信号送入DAS-20多路数据采集器的同时,经跟随器隔离,将模拟量送到SC16型光线记录示波器上记录,作为参考数据。

6. 系统中选用了工业用热电偶和进口的高温压力传感器。

三、应用程序

几年来,我们应用该系统进行多种不同的试验,针对各种试验的特点和要求,编制了一套发动机和电磁阀测试程序,这些程序主要有:

(1) 压力或推力传感器标定程序:用于压力或推力传感器试验前现场标定。

(2) 流量传感器标定程序:流量传感器试验室标定。

(3) 发动机连续点火测试程序:测试发动机稳态工作性能。

(4) 发动机脉冲方式点火测试程序:测试发动机脉冲工作性能。

(5) 切向发动机试验程序:分段测试切向发动机点火后不同工作时间内的性能参数与切向发动机总冲量。

(6) 发动机关阀后残余压力延时过程测试程序。

(7) 小冲量测试程序:测试发动机点火时间从几毫秒到一百毫秒变化时发动机冲量的变化。

(8) 电磁阀性能测试程序:测试发动机组件中的电磁阀性能。

上述程序中,就处理的实时性而言可分为两类。一类要求处理的速度能跟上试验过程的变化,否则就会丢失一些数据,这类程序我们全部采用汇编语言编写。例如:发动机脉冲方式点火试验程序、切向发动机试验程序以及发动机关阀后残余压力延时过程测试程序。另一类对处理速度的快慢没有很严格的要求,主要是从处理的精度、编程与使用的方便考虑。这类程序我们选用高级语言N-BASIC、FORTRAN与汇编相结合的方式编程。例如小冲量测试程序,我们用FORTRAN与汇编连接,处理部份用高级语言FORTRAN,数据采集部分用汇编。其他的程序处理部份用BASIC编程,数据采集部份使用汇编程序,在BASIC中以USR函数形式被调用。

现把这些程序中具有典型性的几个简单介绍如下:

1. 压力传感器标定程序

该程序由N-BASIC处理程序和以机器语言编写的数据采集子程序组成(框图附后)。采集子程序以USR函数形式在BASIC中被调用。该程序用于压力传感器的标定,也可用于推力传感器的标定。标定前通过人机对话方式将标定时间、选用的多路数据采集器的通道地址,传感器以及标准级差等由键盘输入。为使标定结果清晰直观,以列表方式在终端上显示。在整个标定过程中,随时提示你将要校准的载荷级值数,当传感器被加载到应校准的级值后,只要按下回车键,就可自动把该校准值采入内存,并提示下一校准级值数。全部校准级值采入后,

以最小二乘法来拟合传感器的特性曲线。并将原始数据和拟合曲线参数以表格方式在终端上显示和打印机打印输出。如果原始数据和拟合曲线参数需要记盘保存, 只要从键盘上打入存盘文件名就可自动记盘。无需记盘时键入“N”, 标定结束。

程序中选用校准级 $K = 8$, 总校准点 $N = 32$ 。而每一个校准点我们取 8 点的平均值, 提高标定结果的稳定性。

传感器特性方程用线性方程表示,

即: $p = b + mx$

式中: p ——压力(或推力)值

x ——计算机从多路数据采集器采入的编码值。

b ——特性方程的截距

m ——特性方程的斜率。

$$m = \frac{K \sum_{i=1}^K x_i \cdot p_i - \sum_{i=1}^K x_i \cdot \sum_{i=1}^K p_i}{K \sum_{i=1}^K x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^K x_i \right)^2} \quad (K = \text{校准级数})$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^K x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^K P_i - \sum_{i=1}^K x_i \cdot \sum_{i=1}^K (x_i \cdot p_i)}{K \sum_{i=1}^K x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^K x_i \right)^2}$$

并列出现传感器在各校准级与拟合曲线的偏差值与非线性。

$$\Delta_i = p_i - (mx_i + b)$$

$$\delta_L = \frac{\Delta_{max}}{P_{F.S}} \times 100\%$$

($P_{F.S}$: 满量程值)

用户可以根据标定结果和具体的试验要求, 确定传感器是否满足要求, 并用该拟合曲线在试验中进行数据处理。

试验表明, 现场标定常可有效的减小测试系统误差。

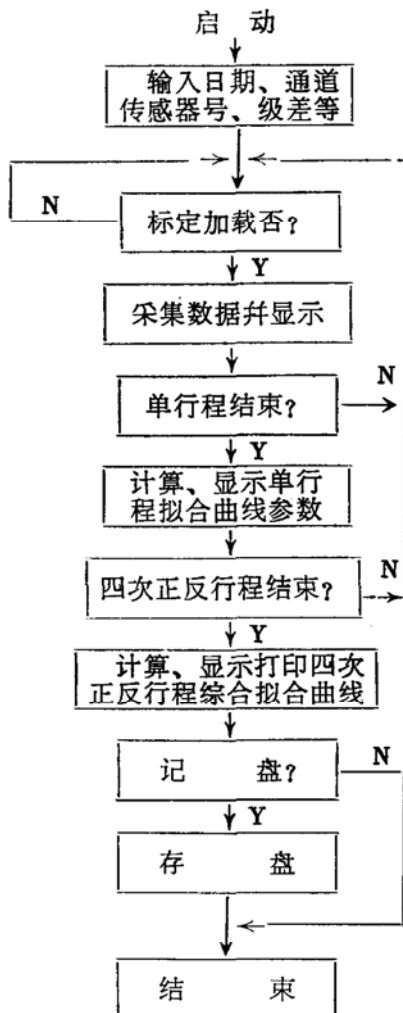
2. 发动机脉冲方式点火试验程序

长寿命卫星姿控发动机的工作状态中, 脉冲工作冷启动的次数占的比重最大, 因此在试验中该程序使用最频繁。

该程序主要功能为: 发动机试验过程控制、发动机参数采集、处理数据、打印输出处理结果和原始数据存盘。

(1) 试验过程控制

在试验过程中, 程序控制有点火次数, 点火时间、点火周期、传感器零点采集、数据采集等。为协调上述控制时间, 程序中使用 PC-8000 微机内部 600Hz 定时中断源。程序对定时中断进行计数, 根据计数值来判断试验进行到那种控制状态。



压力传感器标定程序流程框图

在发动机点火过程中, 温度变化范围是很大的, 系统中使用了高温压力传感器, 并对传感器外壳采取冷却措施以减小温度的变化。另外在程序中采用了零点采集程序, 即在发动机点火前10ms将各传感器零点采入, 在数据处理过程中再将零点值减去, 这样可在一定的范围内减小传感器的温漂与时漂带来的误差。

(2) 数据采集

程序中设置数据区, 根据数据采集的先后以地址增量的方式存放数据。数据采集是从阀门打开时开始, 采样间隔是由机内定时中断源控制, 即每两个数据的时间间隔是1.67(5/3) ms。这样根据存放数据的地址就可计算出相应的时间参数。

在发动机阀门关闭后, 燃烧室压力等参数还要维持若干毫秒, 持续时间视发动机的性能不同而不同。为争取更多的机时留给数据处理程序使用, 程序中在每次采集燃烧室压力数据后与上一次脉冲燃烧室压力值的10%相比 (第一个脉冲燃压值为指定值), 当低于前次脉冲燃压值的10%时, 采集数据结束, 进入数据处理程序。为防止意外因素而出现燃压值持续高于前次稳定段燃压值的10%以上, 采样点数无限增加, 影响下个脉冲的正常进行, 程序中设置最长采样时间控制, 当超过这个时间自动结束数据采集进入数据处理程序。

(3) 数据处理

在发动机脉冲工作状态试验中, 主要处理的参数如下:

N_o ——发动机脉冲点火次数

p_F ——燃料贮箱压力

p_c ——脉冲工作时稳定段燃烧室压力平均值。

F ——脉冲工作时稳定段推力平均值。

$p_{i,n}$ ——电磁阀入口压力。

G ——脉冲工作时稳定段流量平均值。

Q ——单脉冲燃料总流量。

$$Q = \int_{T_0}^{T_{10}} G(t) dt$$

T_{90} ——脉冲工作时, 燃烧室压力值从点火指令开始上升到稳定段燃压值的90%所需要的时间。

T_{10} ——脉冲工作时, 燃烧室压力值从点火指令开始到关阀后燃烧室压力值下降到稳定段燃压值的10%所需要的时间。

I ——冲量

推力测量是一件相当麻烦的工作, 在大量的试验中我们是采用燃烧室压力值乘推力系数($C_F A_t$)来计算推力。

$$I = \int_{T_0}^{T_{10}} F(t) dt = \int_{T_0}^{T_{10}} C_F \cdot A_t \cdot p_c(t) dt$$

I_s ——旋转冲量。

$$I_s = \sqrt{\left(\int_{T_0}^{T_{10}} F(t) \sin \omega t dt\right)^2 + \left(\int_{T_0}^{T_{10}} F(t) \cos \omega t dt\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\int_{T_0}^{T_{10}} C_F \cdot A_t \cdot p_c(t) \sin \omega t dt\right)^2 + \left(\int_{T_0}^{T_{10}} C_F \cdot A_t \cdot p_c(t) \cos \omega t dt\right)^2}$$

(ω : 卫星旋转的角速度)

T_s ——旋转质心。

$$T = \frac{1}{\omega} t g^{-1} \frac{\int_{T_0}^{T_{10}} F(t) \sin \omega t dt}{\int_{T_0}^{T_{10}} F(t) \cos \omega t dt}$$

$$= \frac{1}{\omega} t g^{-1} \frac{\int_{T_0}^{T_{10}} C_F \cdot A_t \cdot p_c(t) \sin \omega t dt}{\int_{T_0}^{T_{10}} C_F \cdot A_t \cdot p_c(t) \cos \omega t dt}$$

$$= \frac{1}{\omega} t g^{-1} \theta$$

I_{CR} ——累积旋转冲量

$$I_{CR} = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^{50} \int_{T_0}^{T_{10}} F(t) \sin \omega t dt \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{50} \int_{T_0}^{T_{10}} F(t) \cos \omega t dt \right)^2}$$

$$= C_F \cdot A_t \cdot \sqrt{\left(\sum_{n=1}^{50} \int_{T_0}^{T_{10}} p_c(t) \sin \omega t dt \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{50} \int_{T_0}^{T_{10}} p_c(t) \cos \omega t dt \right)^2}$$

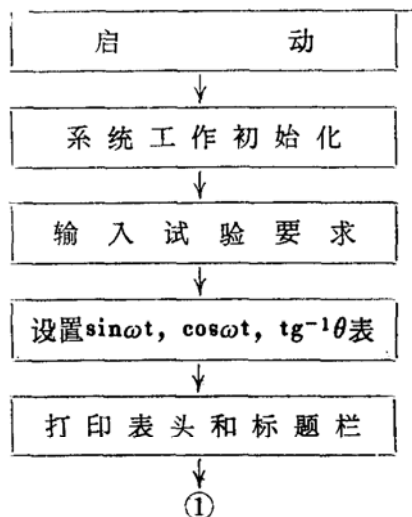
数据处理是利用发动机脉冲周期中数据采集间隔的时间进行的。为提高处理精度，在上述数据处理中，积分运算部份使用了辛卜生公式法。

(4) 输出处理结果和原始数据的保存

在一次试验中，脉冲点火次数多到几千次甚至几万次，不但原始数据量十分庞大，而且处理结果的数据量也十分庞大，计算机有限的内存是无法存放的。因此，在每个脉冲后，程序中及时将处理结果打印输出，以腾出内存给下一个脉冲数据使用。从既要适应打印机打印速度，又要使打印结果清晰、直观考虑，将全部处理结果以表格方式在一行中打印输出。为了以后查找分析数据方便，试验前通过人机对话方式将试验时间、试验编号、脉冲个数等参数输入，作为数据表头打印输出。

在试验中，可能临时出现某次脉冲数据特别有意义，需要保存起来供进一步分析处理。程序中编排了将原始数据自动记盘识别程序，在连续的脉冲试验过程中，只要按下字符“A”，程序将自动调入原始数据记盘子程序。这时除将处理结果打印输出外，还将原始数据存入软盘中保存。而按下字符“B”后，程序将退出原始数据记盘工况。必须说明的是，因记盘程序需要一定的工作时间，在进入原始数据记盘功能时，发动机脉冲工作1200ms的周期时间将被适当的延长。

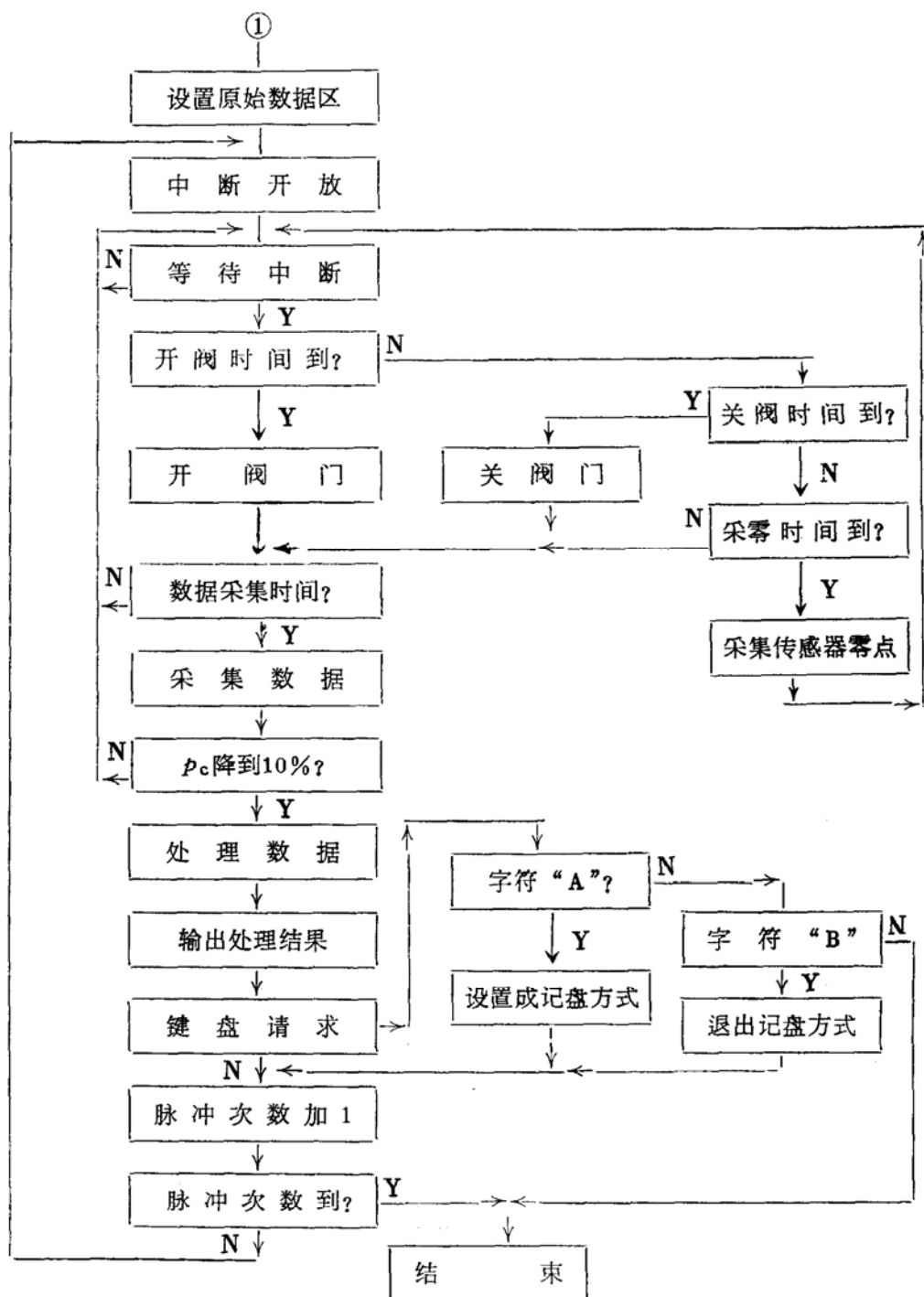
脉冲试验程序框图



另外，程序中还编排了紧急情况下中止试验的功能。在正常的试验过程中，只要按下除字符“A”与“B”以外任何其他键，程序将关闭发动机自动中止试验。

3. 电磁阀性能测试程序

从发动机的角度出发，在电磁阀诸多的性能参数中，主要关心电磁阀开关的响应时间、动作时的电流变化以及开阀后稳定电流。从电工原理来看，电磁阀控制电路即可等效为一个简单的RL串联电路。开阀过程即是RL电路通电过渡过程，回路电流变化是：



$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

而关阀过程是 RL 电路断电后电流衰减过渡过程，回路电流变化：

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}$$

在阀门动作的过程中，阀芯产生位移。该位移使电感 L 值产生变化，也就是改变了电流曲线变化的指数率，在电流变化曲线上形成一个回跳。因此，我们可以用测电磁阀线圈回路中电流变化来指示阀门动作过程。

测试程序用 $BASIC$ 语言编写。数据采集速率选用 10kHz ，即两点采样间隔时间 0.1ms ，

这样可使处理的时间分辨率为0.1ms。数据采集子程序用汇编语言编写,以USR函数的形式在BASIC程序中被调用。程序中以人机对话方式输入试验日期、电磁阀供电电压、电磁阀承载压力值等。阀门连续开关动作1000次(或者指定的次数),在每次动作后处理电磁阀参数有:

T_1 ——从给出开阀命令到开阀动作开始的时间。

I_1 —— T_1 时通过阀线圈电流。

T_2 ——从给出开阀命令到阀门全部打开的时间。(注: T_2-T_1 是开阀时衔铁动作时间)

I_2 —— T_2 时通过阀线圈电流。

T_3 ——从给出关阀命令到关阀动作开始的时间。

I_3 —— T_3 时通过阀线圈电流。

T_4 ——从给出关阀命令到阀门完全关闭的时间(T_4-T_3 是关阀时衔铁动作时间)

I_4 —— T_4 时通过阀线圈电流。

I_0 ——开阀后的稳定电流。

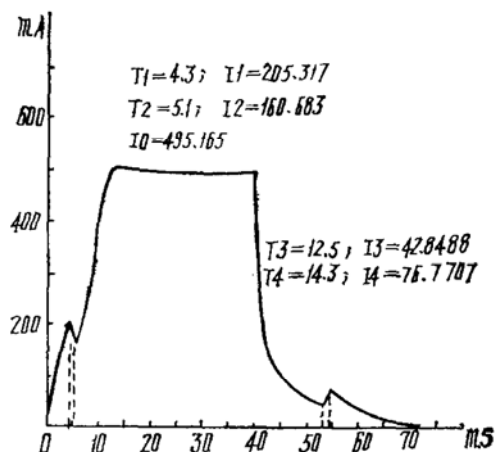


图5 阀门电流变化曲线

程序中将每次动作的上述参数以表格方式显示并打印输出。通过阀线圈的电流变化过程,也就是阀门动作过程,将电流变化的曲线画出来,可直观的反映出阀门动作特性(见图5)。

三、系统测量精度

系统中影响测量精度的环节主要是多路数据采集器、前置放大器、传感器以及计算误差等。其中多路数据采集器的精度是0.1%,前置放大器的精度是0.1%,传感器的精度则视品种不同而不同。我们以系统中使用最多而且是最主要的压力传感器为例来进行测量精度讨论。系统中使用的压力传感器精度是0.1%,其桥路供电电源精度也是0.1%。如以均方根误差算法,压力测量精度是0.2%;如果再考虑到计算误差,其总精度不会低于0.3%。当然我们也可抛开传感器的误差,这样以均方根法可算出精度是在0.2%以内。

系统中使用了压力、推力、流量、温度等多种传感器,其精度也不一样。例如推力和流量传感器精度就低于压力传感器的精度,而压力传感器的精度也随使用时间的加长而下降。因此我们在实际的使用中,除温度传感器外,多采用现场连同系统一块标定的办法。这种方法虽然给使用带来一定的麻烦,但可有效的克服系统偏差,在标定的同时,又可验证系统工作是否正常。

该测试系统是在使用中不断得到改进的,并且在几年的使用中,围绕着发动机测试,完成了一套测试程序,试验中取得满意的效果。从发动机试验的要求来看,系统配置较为合理,使用灵活性较大。

参 考 文 献

- (1) 姿控发动机快速脉冲参数测量和计算机数据处理系统,《控制工程》,1981年,第一期。
- (2) 姿控执行机构的测控系统,《控制工程》,1982年,第三期。