

小推力姿控发动机的推力测量*

岑乐观 毕毓秀 罗胜初 张贻恭

(大连工学院机械系)

摘要: 本文提出一种新的测量微小推力的系统, 设计出新的推力测量仪和为测力仪专门研制一种高灵敏度的压电石英传感器。系统允许测量的范围为: 推力上升时间 ≥ 3 毫秒, 力值 $0 \sim 200$ 克, 有效工作频带 $0 \sim 240$ 赫芝。

在真空度为 0.1 千的真空舱中, 为标称推力为 50 克力级的卫星姿控发动机作了长脉冲及短脉冲的推力实测, 也作了不同推力上升时间的短脉冲模拟推力测量。系统具有瞬态响应性能好、灵敏度高、不确定度小、性能稳定、结构简单等特点。为我国空间事业提供了静、动态小推力测量的手段。

本文除介绍工作原理外, 还有实验室标定数据及真空舱中推力实测数据。

一、前 言

姿控发动机是现代空间飞行器中不可缺少的组成部分, 为使卫星保持稳定、修正姿态, 弹头的变轨、分导再入等, 需要由姿控发动机提供控制力及控制力矩, 它们通常是以脉冲方式进行工作。根据使用场合的不同, 对姿控发动机的推力大小也有不同要求, 大的可达几百公斤, 小的可以是几克到几十克力。对大于几百克以上力级的姿控发动机, 其推力测量手段在国内已经解决。我们的任务是: 为几克到几十克力级范围的发动机提供动态、静态推力测量的手段。要求系统能够测量推力上升时间为 5 毫秒的脉冲推力。我们研制的测试系统已自 1981 年初开始参与标称推力为 50 克力的肼分解发动机的全程序热试车, 进行了推力实测, 取得了大量可靠的数据。

二、推力测量方案的选择

目前国内外用于测量姿控发动机推力的装置基本上都是采用“位移”型。即是受力后靠弹性环节出现变形, 使敏感元件发出与变形位移量相对应的电信号, 经过处理得到要测的力值。所用的敏感元件有电阻应变元件、电容式应变元件或电感式应变元件等。

从力学角度来看, 推力测量方案不管其测量装置的结构如何不同, 都可用图1的力学模型表示。设有一个随时间变化的推力 $F(t)$ 作用在由等效弹簧支承的等效质量上, 并使之产生等效位移 X 。如果推力按正弦规律变化, 则测力架的运动方程可用下式表示:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) = F_0\sin\omega t$$

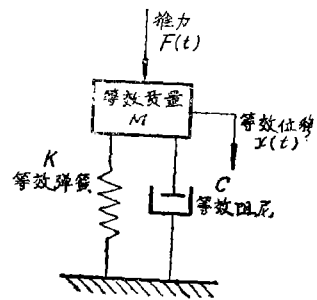


图1 力学模型

* 本项工作已于 1982 年 6 月进行了技术成果鉴定。

式中： F_0 、 ω 、 t 分别为推力的最大幅值、角频率、时间。

M 、 C 、 K 、 X 为运动部分的等效质量、等效阻尼系数、等效弹性系数及位移量。

在振动力学中已证明：只有当 $\omega \ll \omega_0$ 时 (ω_0 为系统固有角频率) 才可以用 $F(t) \approx KX$ 。如果被测的力 $F(t)$ 很小，为了使应变元件有足够的变形量，即 x 不能太小，要保持合适的数值，就得把 K 值降到很小，这样就导致测试系统的固有频率大为降低。在这种条件下，要

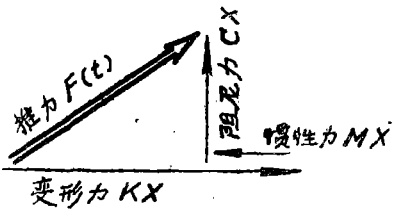


图 2、动态力的矢量合成

正确的反映一个力的动态过程就应该包含运动方程的三个分量。图 2 示意三个力矢量的合成。通常可以在测取位移量的同时用加速度计同时测出加速度，并将加速度值进行积分或位移值进行微分得出速度值，然后各自乘以相应的系数后相加得到所要测的力 $F(t) = F_0 \sin \omega t$ 。

这种方案使系统相应的复杂化，而且当 K 值太小时，还可能使整个系统失去稳定性。同时推进剂的导管、压力传感器的导线，冷却水管、测温导线等一些非线性的元件都将以并联“弹簧”的身份在系统中起作用，破坏了信号的真实性和准确性。如果要测试几十克力级的推力，又要保持“位移”型系统的灵敏度，系统的固有频率只能有 25 赫芝左右，远远低于所需的工作频带。在国外采用反传递函数也就是电子线路补偿的方法对系统的频带进行扩展。不管是用加速度计或电子线路补偿、除了系统复杂以外，随着工作条件的变化，要对补偿系统的各项参数进行重新调试，在使用时比较麻烦。

为了测试几克到几十克力级的推力，又要使系统简单可靠，我们选择了压电式“无位移”型的测力方案。采用这种方案测力时，系统的 K 值与欲测的推力大小没有牵连关系，系统的刚性可以根据结构的可能尽量提高，因此系统的固有频率高。此外压电传感器不仅能测得弹性变形力，也同时测得惯性力，所以最适于直接测取动态推力。

为了更好的了解测力仪的设计，这里简单叙述一下压电效应。有些晶体具有在机械应力作用下，在其表面产生电荷的特征。最为广泛使用的材料是石英晶体。在石英晶体中可以观察到如下三种压电效应，即纵向效应，横向效应和剪切效应，见图 3。静电荷的数量与所施

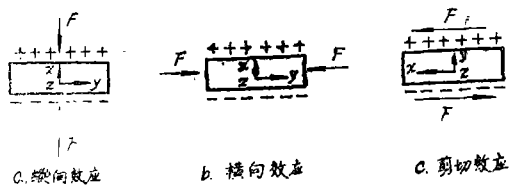


图 3 压电效应

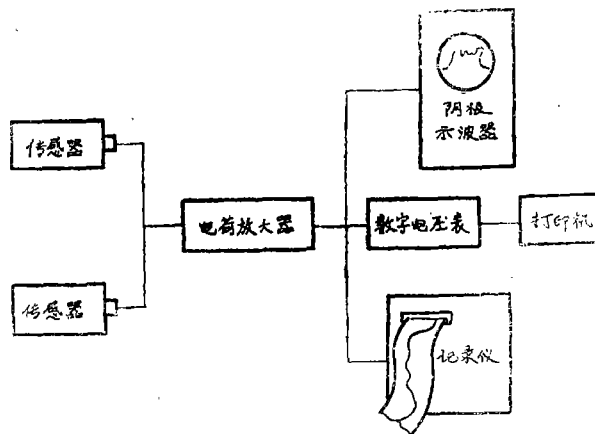


图 4 力电讯号传输图

加的载荷成严格的线性关系。把出现在石英片表面的电荷用电极搜集起来，并由电荷放大器将其转换成相应的电压信号，所以压电测力系统是比较简单的，其力电讯号传输方式见图4。由于石英具有高度的稳定性，因此制成的传感器一旦在测力仪中安装完毕，其灵敏度为一固定常数，不必经常进行标定。

三、T—1型推力测量仪的设计

T—1型推力测量仪的结构如图5所示。它主要由定架、动架（在每公斤力作用下约移动0.01微米，可以说实际上并不动）、上下两个传感器和标定器等几个主要部分组成。发动机连同电磁阀可用螺丝固定在动架的端面。

在设计一开始，我们首先考虑到的问题是传感器在测力仪上的安装方式。要想在0~200克力的范围内取得力电讯号的完全线性响应，绝对不允许由于紧固元件等原因使微小的力讯号有所衰减或畸变。通过几种方案的试验比较，现在采用的结构能够保证作用力完全1:1的作用在传感器上。

其次，考虑到测小力时要保持输出终端有恰当的信噪比，而且由于电荷放大器不可避免的零点漂移对测量精度的影响，我们专门为测力仪研制了一种具有更高灵敏度的传感器。此外，为了准静态力的测定，要求传感器有很高的绝缘阻抗。由于对传感器的制作工艺作了一定的改革，在取得高灵敏的同时保证传感器具有大于 10^{13} 欧姆的阻抗。

为保证静态标定的准确性，标定器采用与天平结构类似的杠杆。杠杆比采用1:1，杠杆比的误差要求控制在0.05%以内。杠杆支点用玛瑙座及淬火钢刀口组成，为保持支点的精确度，标定完后可以把杠杆及砝码盘卸下。

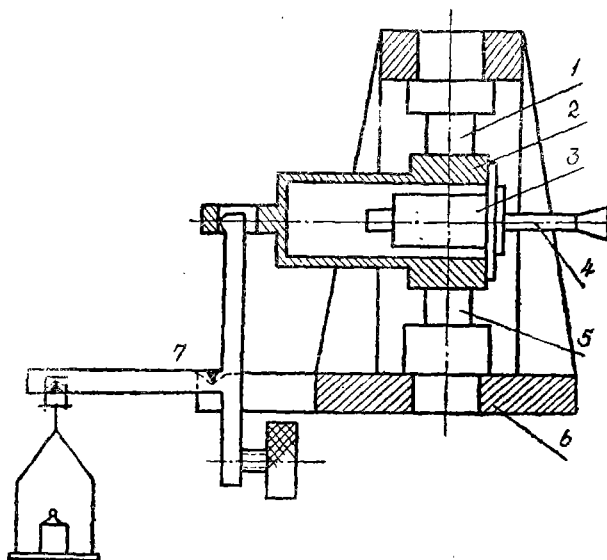


图5、测力仪结构示意图

1. 上传感器
2. 动架
3. 电磁阀
4. 发动机
5. 下传感器
6. 定架
7. 标定机构

四、推力测量仪的性能

为了说明本测力仪的性能，在此列出一些实验室标定的数据及在真空舱中进行推力实测的部分数据及图线。

1. 砝码标定

用标准砝码对测力仪作了静态标定，标定结果见表1。输出数据是由四位数字电压表读出。

表 1 砝码加载标定表

砝码值 (克)	输出 电 压 mV		差 值 $\Delta = Y' - Y$	均 方 值 σ_{n-1}
	实测平均值 Y	计 算 值 Y'		
25	101.330	101.64	+0.31	0.77
50	202.833	203.35	+0.52	1.09
75	305.469	304.99	-0.48	0.939
100	406.525	406.588	+0.063	0.638
200	813.117	813.117		0.847

按端点法计算线性度误差:

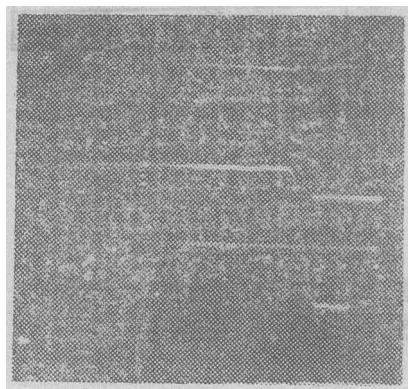
$$\text{线性度} = \frac{\Delta_{\text{最大}}}{Y_{\text{最大}}} \times 100\% = \frac{0.52}{813.117} \times 100\% = 0.064\% F \cdot S$$

按最大均方差的二倍计算重复性误差:

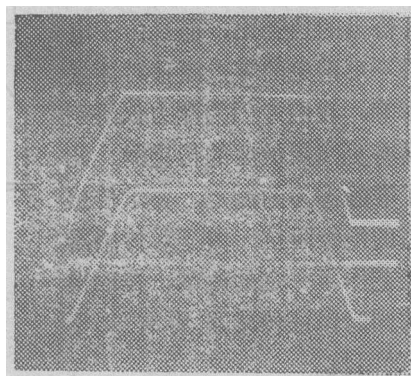
$$\text{重复性} = \frac{2 \times \sigma_{n-1}}{Y_{\text{最大}}} \times 100\% = \frac{2 \times 1.09}{813.117} \times 100\% = 0.26\% F \cdot S$$

2. 用模拟推力标定

采用电磁激振器来模拟发动机的脉冲推力。用可以调制波形的讯号发生器输出所需上升时间的梯形脉冲，经功放后推动激振器。用阴极示波器观察模拟力脉冲波形与测力仪输出波形的对应情况。图 6、a 及 6、b 分别为推力上升时间为 5 毫秒及 10 毫秒的模拟推力脉冲波形，所模拟的力值相当于 25 克力，图中的时标间隔每格代表 1 毫秒。



a. 模拟力时标输出



b. 模拟力时标输出

图 6 模拟脉冲推力

改变激发电流大小就相当于改变模拟力的大小，表 2 列出模拟力电流与测力仪输出的关系。

3. 幅频特性

用电磁激振器以不同频率的正弦波对测力仪进行激振（每隔 10 赫芝激振一次）。在 250 赫时出现谐振，幅值比为 +4.6db。故有效工作频带为 0~240 赫，在此频带内的平坦度为 ±1db，在此频带宽度下测取上升时间为 3 毫秒的模拟推力时没有发现超调现象。图 7 为其幅频特性曲线。

4. 温度对灵敏度的影响

表 2 模拟力电流与输出关系

模拟输入		输出电压 mV		差值	均方差
力级 (克)	电流 mA	实测平均值 Y	计算值 Y'	$\Delta = Y' - Y$	σ_{n-1}
近似25	80	100.125	100.027	-0.1	0.478
近似50	159.58	198.562	199.533	+0.97	0.495
近似100	326.25	408.375	407.5	-0.875	0.377
近似200	638.33	798.133	798.133		0.359

按端点法计算线性度误差：
 线性度 = $\frac{\Delta_{最大}}{Y_{最大}} \times 100\% = \frac{0.971}{798.133} \times 100\% = 0.12\% F \cdot S$

按最大均方差的二倍计算重复性误差：
 重复性 = $\frac{2 \times \sigma_{n-1}}{Y_{最大}} \times 100\% = \frac{2 \times 0.495}{798.133} \times 100\% = 0.12\% F \cdot S$

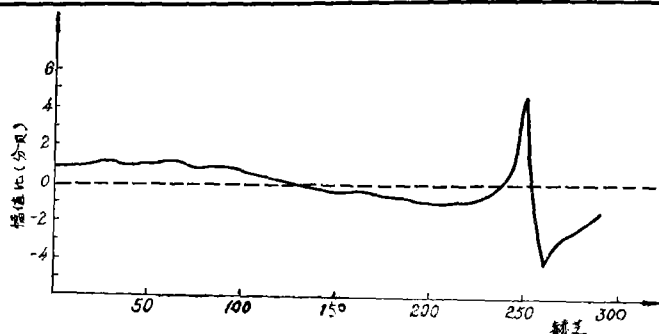


图 7 幅频特性

将压电石英传感器由室温加热到140℃，作了温度与灵敏度关系的实验。实验表明压电石英传感器的灵敏度随温度升高而降低，其变化率小于0.02%/℃。也就是说如果真空舱的温度波动100℃造成的测量误差才2%。实际热试车表明舱内温度波动很小，故对温度变化引起的误差可以略去不计。

5. 真空舱中推力实测

在真空度 < 0.1 托的试验舱中，对研制型的姿控发动机作了长脉冲及短脉冲推力实测。为了观察燃烧室压力与发动机推力的对应关系，此处摘取两段工作在特殊“粗糙运行”情况下的推力示波图。图 8.a 及图 8.b 是从同一次脉冲示波图中摘取下来的。由于胼管中有大量未排除的空气，所以电磁控胼阀开启后推力与压力没有立即升高，图中推力线的开始端是尚未滤除的高频谐波。示波图充分显示了推力与压力瞬态变化的密切对应关系。

在电磁控胼阀开闭过程中，由于阀芯的加速启动与减速停止的反作用力，开阀时阀芯向后移动反作用力与推力方向相反，阀芯减速停止时反作用力与推力方向相同。阀门关闭时情况则相反。图 9 是不通胼时阀门开闭的反作用力示波图。

图10是100毫秒短脉冲的实测示波图。可以见到推力曲线上叠加有开闭阀门时的反作用力波形，而压力曲线则不受此力影响。示波图中还载有90赫芝的振动波形，这是由电磁阀开闭的撞击力激起的真空舱支架90赫芝谐振波。我们采用柔性带将推力测量仪悬挂起来的办法已经排除了这种干扰，但由于其它原因尚未作热试车实测。

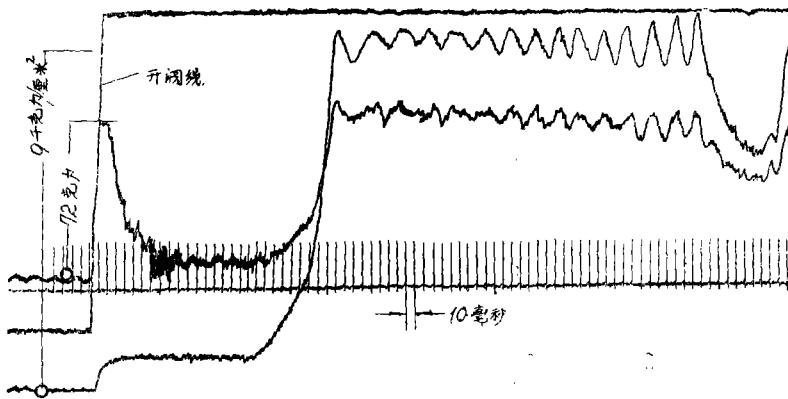


图8 a. 推力与压力瞬态对应示波图之一

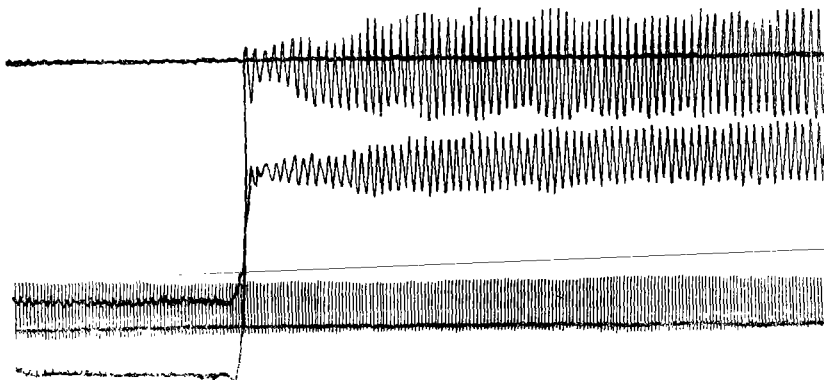


图8 b. 推力与压力瞬态对应示波图之二

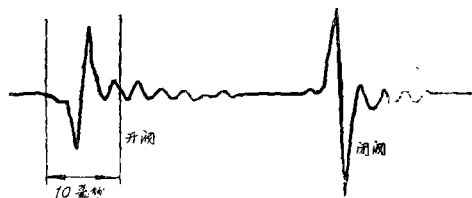


图9. 阀门开闭时的反作用力

为了进一步说明推力实测情况，表3列举三台发动机热试车的部分测量数据，测试条件①150℃及200℃温起动、30秒长脉冲，②在高、中、低三种室压下各重复三次。采用回归分析法对室压 P （单位：公斤/厘米）及推力 R （单位：克力）进行数据处理。其回归方程为：

$$R = mP + b$$

$$\text{式中：} m = \frac{\sum(P - \bar{P})(R - \bar{R})}{\sum(P - \bar{P})^2}$$

$$b = \bar{R} - m\bar{P}$$

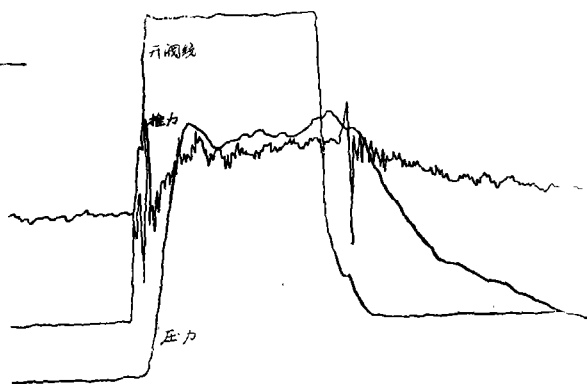


图10 100 毫秒短脉冲实测示波图

以标准偏差 σ 衡量数据的离散程度:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum [R - (mP + b)]^2}{n - 2}}$$

精度用 $\frac{\sigma}{R_{\text{最大}}} \times 100\%$ 表示

由于目前还是采用人工判图, 示波图高度的判读误差接近 $\pm 1\%$, 再加上SC16 示波器振子误差 $\pm 3\%$, 所以实测的精度低于标定精度。下一阶段将用计算机连机进行数据处理, 综合测试精度将会有所提高。

表 3 发动机室压 P 与推力 R 实测数据

发动机号	P	R	发动机号	P	R	发动机号	P	R
F1	3.5	25.5	J12	3.45	29	F9	6.5	53.5
	3.6	26		3.45	29		6.7	57.5
	3.7	28		3.55	30		6.75	56
	5.35	39.5		6.5	52			
	5.4	38		6.6	52		4.35	35
	5.8	42		6.65	56		4.3	35
	6.3	43.5		8.15	69			
	6.35	45.5		8.15	70		3.2	24.7
	6.85	47.5		8.3	69		3.2	24.5
	7.25	49.5		8.5	73		3.25	23
	9.4	65		8.55	74			
	9.5	63		8.6	72			
平均值	$\bar{P} = 6.08$	$\bar{R} = 42.75$	平均值	$\bar{P} = 6.704$	$\bar{R} = 56.25$	平均值	$\bar{P} = 4.78$	$\bar{R} = 38.65$
回归系数	$m = 6.37$		回归系数	$m = 8.576$		回归系数	$m = 9.17$	
	$b = 4.02$			$b = -1.24$			$b = -5.18$	
回归方程	$R = 6.37P + 4.02$		回归方程	$R = 8.576P - 1.24$		回归方程	$R = 9.17P - 5.18$	
标准偏差	0.91		标准偏差	1.46		标准偏差	0.95	
精 度	1.4%		精 度	1.97%		精 度	1.65%	

五 结 论

通过推力实测与标定表明本推力测量仪具有①足够的灵敏度②瞬态响应性能好③结构简单稳定可靠④使用操作方便等优点。据目前能够查到的资料来看, 在国外与我们同等力级范围的推力测量是依靠复杂的补偿手段来解决的, 本方案不要任何补偿就能直接测取动、静态推力, 是一条新的途径。由于在国内测量这么小的推力还是第一次尝试, 必然还存在考虑

不周的问题，还要进一步总结与提高

参 考 文 献

- [1] B.C.Barber;1977.2.ADA 044987.
- [2] A.H.Boyd;Instrumentation in the Aerospace Industry 1969,15.
- [3] F.L.Crosswy,H.T.Kalb;1968.9 AEDC-TR-68-117,AD675208.
- [4] F.L.Crosswy,H.T.Kalb;1968,11,AD678857,AEDC-TR-68-202.
- [5] 孙宝元,张贻恭,杨华敏;《机床》1979 5,1~5页。
- [6] 卞水思;《发动机测试技术选编》,七机部技术局编印,1979,68页。