

液体二次喷射的时间响应特性

郑 盛 火

摘 要

本文着重分析了液体二次喷射系统从指令信号到产生侧向力各环节的时间滞后特性,介绍了二次喷射侧向力时间响应特性的试验研究。试验结果表明,侧向力的产生相对于喷射活门开启的纯滞后时间为4毫秒左右,与理论分析的预计值基本相符。此外,还获得一些有价值的试验结果,为导弹飞行的稳定性分析提供了试验依据。

一、引 言

液体二次喷射推力向量控制具有准确迅速地提供侧向控制力的优点,已广泛地应用于固体导弹,如美国的“北极星”,法国的 M_1 、 M_2 导弹等。二次喷射系统的时间响应特性与控制系统的稳定性能密切相关,特别是存在的某些纯滞后环节。因此,在进行二次喷射侧向力测量试验的同时,对二次喷射系统的时间响应特性,特别是侧向力的纯滞后时间,进行了认真的试验研究。

二、分析与预计

当二次喷射系统接到控制指令后,随即控制喷射活门开启,喷射工质就从喷射孔喷出,并在喷管内与发动机的主喷流混合、相互作用而产生侧向力。由此看出,二次喷射系统的时间响应包括:

(1) 电指令信号,这可以认为是瞬间的,没有滞后延迟;

(2) 喷射活门开启(反馈信号)相对于指令信号的响应滞后时间,国外资料报道为15毫秒至150毫秒,一般为70毫秒;

(3) 在喷射活门开启同时,喷射工质开始流动、达到喷射孔满流,并通过喷射孔进入喷管。喷射工质的流动相对于喷射活门开启的响应滞后时间,国外资料报道为1毫秒至10毫秒;

(4) 喷射工质流与喷管内的发动机主排气流相混合、相互作用而产生的侧向力相对于喷射工质流动建立的响应滞后时间,国外资料报道,这个滞后时间一般小于1毫秒,有的达到2.5毫秒,如大力神Ⅱ。

二次喷射系统的总的响应时间近似于上述各项响应时间的总和,有的可达到22毫秒左右,可见响应非常快。但是,上述的响应时间只是给出一个变化范围,而对于我们所使用的系统来说,其响应时间是多少,特别是对于各纯滞后环节的滞后时间是多少,则是本文所要研究的。

喷射活门开启相对于指令信号的响应时间(包括纯滞后时间),一般称暂态特性,已在设

计中作为性能指标之一而有严格的要求, 本文对此不做进一步的分析和研究。关于二次喷射系统由工质喷射所产生的侧向力相对于工质活动建立的响应滞后时间, 主要由两部分组成: 一是喷射工质从喷射活门入口喷出后到达喷管内壁出口这段行程所需的时间 (记为 $\Delta\tau_1$); 二是喷射工质在喷管内壁喷出后, 与喷管中的发动机主排气流相互作用产生侧向力的物理过程 (对于活性工质也有化学过程) 所需的时间 (记为 $\Delta\tau_2$)。

在50公斤/厘米²的喷射压力作用下, 工质从喷射活门喷出的初速度为40米/秒左右, 从喷射活门出口至喷管内壁喷射孔出口的距离为70毫米左右, 因此, $\Delta\tau_1 = 1.75$ 毫秒 ≈ 2 毫秒

关于 $\Delta\tau_2$, 假设侧向力产生的物理过程是按工质喷射流与主喷流相互作用产生的压力干扰波的传播速度来考虑, 这个传播速度等于声速, 约1000米/秒, 从喷射孔至喷管出口的传播时间为0.2毫秒左右。但如果假设工质喷出后, 在喷管中迅速雾化、汽化, 并以与主喷流相同的流动速度流动, 那么在这段喷管上的运动时间约0.08毫秒。按照上述的假设, 那么有

$$\Delta\tau_2 \approx 0.08 \sim 0.2 \text{ 毫秒}$$

则侧向力相对喷射活门开启的总响应滞后时间为2.2毫秒左右。

对于大型的发动机如大力神Ⅱ, 其喷射工质与主喷流相互作用产生侧向力的物理过程所需时间约2.5毫秒。事实上, 上述两种假设都是不完全的。因为压力波或者激波的建立也要有一个过程; 对于第二种假设, 工质的雾化、汽化, 然后被加速到与主喷流相同的流动速度, 也要有一个过程, 都需要一定的时间, 所以, $\Delta\tau_2$ 的滞后时间实际上要比上述分析大得多, 为此我们保守地取 $\Delta\tau_2$ 等于2.0毫秒, 那么总的响应滞后时间为:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 = 1.75 + 2 = 3.75 \text{ 毫秒}$$

这个响应滞后时间 ($\Delta\tau$) 属于纯滞后时间。这种纯滞后环节对于稳定系统的性能是极为不利的。

三、试验方案

1. 试验步骤

侧向力测试试验是用六分力试车架进行的。在试验中, 所记录的响应时间不仅有二次喷射系统本身的响应滞后时间, 也包含有测量传感器和六分力架等测量记录系统的响应滞后时间。为此, 试验分两步进行。先进行冷试, 即发动机不点火, 用以测出六分力架测量系统的响应滞后时间; 然后进行热试, 发动机点火, 二次喷射系统向喷管喷射工质, 以产生侧向力。为了比较发动机质量对响应滞后时间的影响, 在冷试时, 分别用装药的发动机和不装药的空壳发动机进行。在发动机热试前也做了冷试, 以便排除由于安装上的原因而可能带来的测量误差, 使试验结果更为准确可信。

2. 试验方案

发动机试件上先装好二次喷射活门等有关设备, 然后用六分力架将发动机试件悬吊于试验台上。发动机前端面通过过渡架和测力传感器紧顶住推力墙。在发动机的前后两侧各安装一个侧向力测量用的测力传感器。这些测力传感器要安装在同一水平面内。发动机试件的安装示意图见图1。

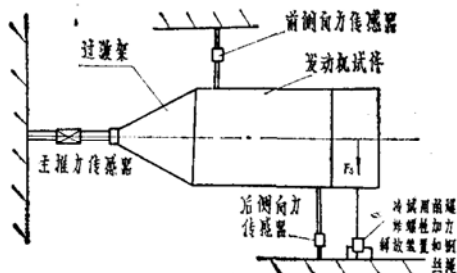


图1 试验安装示意图 (顶视)

冷试时,将发动机试件(装药和空壳)按热试时的安装状态和要求安装好。为了模拟工质喷射产生的侧向力,在相应于喷射活门所处的轴向位置上,用一根细钢丝绳一端拉住发动机试件,一端固定在爆炸螺栓加力释放装置上,这个加力释放装置固定在侧面墙上(如图1)。冷试前,通过爆炸螺栓加力释放装置将钢丝绳拉紧并加一定量的力(这相当于加有侧向力),侧向力传感器就有信号输出。试验时,当爆炸螺栓通电起爆后,钢丝绳解锁松开,加在发动机上的侧向力消失,侧向力传感器输出信号也迅速归零,这就相当于作用一个负的阶跃力。记录下通电时间、爆炸螺栓起爆解锁时间和侧向力传感器输出力的响应信号,就可以得到六分力架测量系统本身的响应滞后时间。

热试时,装于发动机喷管上的喷射活门将根据程序控制仪的指令信号向喷管内喷射工质,从而产生侧向控制力。为了准确地测量侧向力和便于响应滞后时间的测量,工质喷射指令信号为时间持续2.5秒的正方波信号,以产生阶跃变化的侧向力。方波指令信号的幅值取大小不同,两个方波信号之间的时间间隔为1秒。试验进行的状态和次数见表1。

表1 试验状态表

序号	试件状态	试验类别	试验次数	备注
1	假药发动机	冷试	3	
2	空壳发动机	冷试	2	
3	热试用发动机	冷试	3	热试前进行
4	同上	热试	1	11个正方波

3. 记录设备

采用R-280C 14路磁带机记录。它同时记录指令信号、反馈信号、喷射流量、侧向力和主推力信号,以及时统和1/10、1/500秒的时标信号,然后根据数据处理的需要通过SC-16光线示波器进行回放。

四、试验结果与分析

1. 冷试结果

当爆炸螺栓起爆后,加在发动机上的侧向力瞬间消失,前后两个侧向力传感器输出是阶跃变化的响应信号,典型的记录曲线如图2所示。通过冷试可以获得六分力架测量系统(包括传感器)本身的时间响应滞后特性,其结果见表2。

由于侧向力响应曲线抖动较大,判读误差较大,但从上表数据看,其一致性很好。两侧

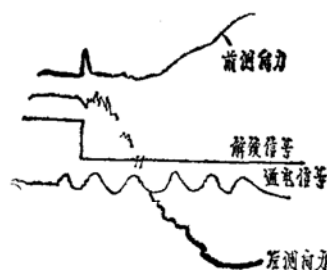


图2 冷试记录曲线

表 2 冷试试验结果

状态	次数	侧向力上升起始点(纯滞后时间)		侧向力达95%的时间	
		前侧向力 τ_{m1}	后侧向力 τ_{m2}	前侧向力 t_{m3}	后侧向力 t_{m4}
状态 1	1	18	3	34	32
	2	16	3	32	24
	3			32	30
状态 2	1		3	31	28
	2		3	32	28
状态 3	1	18	3	30	22
	2	13	3	30	21
	3	16	3	30	22
统计结果	平均	16.3	3	31.4	25.9
	σ_{n-1}	2.0	0	1.4	4.2

注：以力释放瞬时为零秒，单位：毫秒。

前后两个侧向力传感器的响应滞后时间不同，后侧向力的滞后时间要少得多。这是因为后侧向力传感器受到的力比前侧向力传感器大得多，能更快地克服传感器的不灵敏区，响应滞后时间小一些。侧向力变化达95%的时间反映出六分力架响应频率，不完全反映侧向力的变化情况，数据仅供参考。

2. 热试车的试验结果

热试时，喷射活门按照程序控制仪的方波指令信号开启或关闭，因而侧向力是阶跃变化的。方波的幅值根据要求大小不同，产生的侧向力大小也不同。但是，尽管幅值大小不同，侧向力响应曲线和滞后时间基本上相同。典型的响应曲线见图3。

(1) 喷射活门开启时侧向力纯滞后时间

从发出指令信号到喷射活门开启（反馈传感器信号），从喷射活门开启到喷射流量建立，产生侧向力，都存在有纯滞后环节，我们所关心的是从喷射活门开启到侧向力产生这一滞后时间的大小。由于喷射流量的滞后时间受到流量传感器响应特性的影响，而且侧向力相对于活门开启的滞后时间已包含有喷射流量的滞后，所以对喷射流量的滞后特性不详细讨论，表3中所列数据仅供参考。

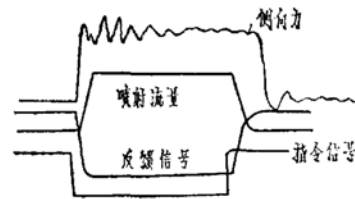


图 3 热试时典型响应曲线

一次热试车时可以加许多方波指令信号，可以得到许多组数据。表3中数据说明，不同的喷射活门开度（或侧向力大小不同），其纯滞后时间大小的一致性很好，说明试验是成功。喷射流量的滞后时间大于侧向力的滞后时间是流量传感器（转子式）的影响所致。表3中所列侧向力滞后时间包含有喷射活门开启和六分力架测量系统的纯滞后时间，所以在喷射活门

表3 喷射活门开启时的纯滞后时间 (单位: 毫秒)

指令 序号	活门开启滞后时间		喷射流量滞后时间		侧向力滞后时间	
	I 喷管 τ_1	III 喷管 τ_2	I 喷管 τ_3	III 喷管 τ_4	前侧向力 τ_5	后侧向力 τ_6
1	6	8	22	28	30	13
2	6	8	20	26	20	14
5	6	8	18	26	22	12
6	4	6	20	24	26	14
7	6	8	22	26	24	10
平均值	5.6	7.6	20.4	26	24.4	12.6
σ_{n-1}	0.9	0.9	1.7	1.4	3.9	1.7

注: 以指令信号为零秒计。

开启的状态下, 侧向力相对于活门开启的滞后时间应是扣除上述两部分时间后的值。对于前侧向力传感器有(τ_{m1} 冷试时测得):

$$\Delta\tau_1 = \bar{\tau}_5 - \bar{\tau}_{m1} - \bar{\tau}_1 = 2.6 \text{ (毫秒)}$$

同样, 对于后侧向力传感器有(τ_{m2} 冷试时测得):

$$\Delta\tau_2 = \bar{\tau}_6 - \bar{\tau}_{m2} - \bar{\tau}_1 = 4.0 \text{ (毫秒)}$$

因为只要有一个喷射活门开启就有侧向力产生, 所以对于前、后侧向力都扣除同一 $\bar{\tau}_1$ 值。所得到的结果与理论预计的3.75毫秒相符合。

(2) 喷射活门关闭时的侧向力滞后

随着喷射活门按指令信号归零而关闭时, 侧向力的作用也消失, 因而其时间响应特性与喷射活门开启的情况不同。试验数据 (见表4) 表明, 活门关闭时的滞后时间要大一些, 其原因可能是在喷射活门开启或关闭时, 侧向力的作用过程不同。在六分力架冷试时侧向力作用状态与喷射活门关闭时侧向力作用状态相似, 因此, 侧向力消失相对于喷射活门关闭的纯滞后时间也是可信的。其数据见表4。

表4 喷射活门关闭时的响应滞后时间 (单位: 毫秒)

指令 序号	活门关闭滞后时间		喷射流量滞后时间		侧向力滞后时间	
	I 喷管 τ_1'	III 喷管 τ_2'	I 喷管 τ_3'	III 喷管 τ_4'	前侧向力 τ_5'	后侧向力 τ_6'
2	8	8	24	27	34	24
7	10	12	24	26	41	26

注: 以指令信号为零秒

与喷射活门开启的情况类似, 对于前侧向力有:

$$\Delta\tau_1' = \tau_5' - \bar{\tau}_{m1} - \tau_1' = \{9.8; 14.8\} \text{ (毫秒)}$$

$$\Delta \bar{\tau}_1' = 12.3 \text{ (毫秒)}$$

对于后侧向力同样有:

$$\Delta \tau_2' = \tau_6' - \bar{\tau}_{m2} - \tau_1' = \{1\}_{13}^3 \text{ (毫秒)}$$

$$\Delta \bar{\tau}_2' = 13 \text{ (毫秒)}$$

因为在喷射活门关闭时记录曲线抖动较大, 仅有两组数据, 仅供参考。

(3) 由指令信号至95%额定值的响应时间

喷射活门开启、喷射流量和侧向力按指令信号变化至95%额定值的响应时间见表5。

表5 由指令信号至95%额定值的响应时间(单位: 毫秒)

指令 序号	喷射活门开启反馈信号		喷射流量		侧向力	
	I 喷管	III 喷管	I 喷管	III 喷管	前侧向力	后侧向力
1	72	78	76	91	62	52
2	62	68	65	80	58	46
5	44	60	56	69	56	42
6	56	60	56	70	56	44
7	66	72	66	84	56	46
平均	60	67.6	63.8	78.8	57.6	46.0
σ_{n-1}	10.7	7.8	8.3	9.4	2.6	3.7

由表5和图3看出, 侧向力的响应时间先于喷射活门开启和喷射流量建立, 这显然是不可能的。产生上述情况的原因是六分力架测量系统本身也是一个二阶环节, 刚度小, 灵敏度高, 响应时间快, 但稳定性差, 所以突然加一个力之后, 六分力架就按本身的固有频率振荡起来, 而不跟随侧向力的变化过程。

3. 试验结果与理论分析预计值的比较

试验结果表明, 侧向力的建立或消失相对于喷射活门的开启或关闭的响应滞后时间是不同的。在喷射活门开启的情况下, 侧向力的产生相对于喷射活门开启的纯滞后时间为2.6毫秒至4毫秒, 与理论上分析预计的3.75毫秒相近, 在喷射活门关闭时侧向力的滞后时间为13毫秒左右。而喷射活门开启滞后于指令信号为8毫秒左右。

五、结 论

本文着重介绍了液体二次喷射侧向力时间响应特性——纯滞后时间的测试试验方案和试验结果。尽管只有一次热试车的多个方波的测量结果, 测得的数据有限, 但其试验数据的一致性很好, 说明试验方案和测试方案都是正确可行的。试验结果表明, 液体二次喷射系统的响应快, 所产生的侧向力相对于指令信号(或喷射活门开启)的纯滞后时间很小, 与理论分析预计和国外资料报道的数据相符合, 完全满足稳定系统的设计要求。