

大 L^* 脉冲发动机内弹道性能的实验研究

北京理工大学 张平** 李葆江 郑晓平 王海丰

【摘要】 本文介绍了远程火箭中间段制导地面动态联试用的大 L^* 脉冲发动机内弹道性能实验研究的情况,包括静态点火试验、动态旋转试验和高低温环境试验的情况。试验数据与设计数据符合良好。试验结果表明,脉冲发动机的主要性能满足与弹上控制系统动态联试的要求,但也带有大 L^* 发动机的某些明显特点。

关键词: 固体火箭发动机 内弹道性能 特征长度 实验

1 引言

为了提高远程火箭的命中精度,采用了在火箭弹道的中间段实施简易制导的技术。充当制导系统中弹道修正执行装置的是安装在旋转弹体周围的多个小型T型固体火箭发动机,它们按照弹上控制系统给出的指令,依次点燃,发出脉冲控制推力。在单个脉冲发动机原理实验样机多次地面静止试验取得成功的基础上,需要进一步将它们安装在旋转试验台上与弹上控制系统进行动态联试,以考核脉冲发动机在动态控制条件下点火工作的可靠性。但是,为了不使现有旋转试验台的转轴承受过大的冲击载荷,在保证脉宽时间和点火延迟要求的同时,需要限制被试发动机的最大冲量值。因而不得不将原样机中的装药量适当减少,而仍维持样机的外形尺寸和燃烧室工作压力不变,这就必然会导致发动机特征长度 L^* (即燃烧室自由容积与喷管喉部截面积之比)的增大(本例的 L^* 为172cm,约为原样机 L^* 的8倍)。试验结果表明,这种脉冲发动机成功地实现了与控制系统的联试,满足联试要求的技术指标,但也必然使试验结果带有大 L^* 发动机的某些特点。另外,研究大 L^* 发动机的工作性能,对适当延长燃烧产物在燃烧室中停留的时间,从而提高短时间脉冲发动机的燃烧效率和冲量效率也是有意义的。

2 试验条件与内容

图1是试验用的大 L^* 脉冲发动机的结构示意图。喷喉直径 $d_t=7\text{mm}$,燃烧室内

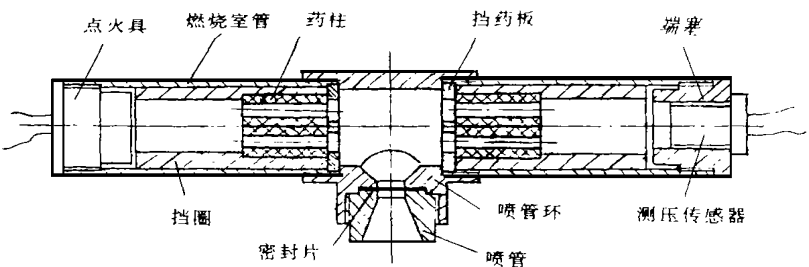


图1 大 L^* 脉冲发动机试验样机结构示意图

径 $D=28\text{mm}$,装药尺寸 $9.0/3.5-25\text{mm}\times 2\times 2$,推进剂牌号HR-1,推进剂密度 $\rho_p=1.75\times 10^{-3}\text{kg/cm}^3$,燃

烧室初始自由容积 $V_i = 66\text{cm}^3$, 喷管堵片厚度 0.1mm , 一侧燃烧室管端部装有瞬发点火具, 另一侧燃烧室管端部装有 FTS 型应变式压力传感器, 点火药量中引火药为 $0.12 \times 10^{-3}\text{kg}$ 速燃药, 加强药为 $1.4 \times 10^{-3}\text{kg}$ 小粒黑火药, 点火破膜压力为 $5\sim 6\text{MPa}$ 。

图 2 是大 L^* 脉冲发动机在旋转试验台上的安装示意图 (有关旋转台的介绍见参考文献 [1])。两台单管样机在旋转臂上 180° 反向安装, 同时工作。这样, 既可保持旋转台的动平衡, 又使两台样机产生的脉冲推力互相抵消, 基本上消除了对转轴施加的瞬态冲击载荷。转臂安装直径为 230mm 。

试验内容按时间先后分为下列三个阶段:

(1) 静态点火试验。将发动机安装在静态试验台上, 测量常温下燃烧室 $p-t$ 曲线, 要求达到常温下最大推力小于 2kN , 脉冲工作时间小于 20ms , 点火延迟 1ms 左右。

(2) 动态旋转试验。将发动机安装在旋转试验台上, 随机点火, 测量发动机在两种转速 (5r/s 和 10r/s) 条件下的常温 $p-t$ 曲线, 并比较与静态 $p-t$ 曲线有何不同。

(3) 高低温环境试验。为模拟环境温度对发动机内弹道性能的影响, 测量发动机在高温 50°C 和低温 -40°C 条件下的静态试验 $p-t$ 曲线, 检验因高低温变化引起的脉宽时间的相对变化量。

在上述三个阶段试验完成后, 再将发动机与弹上控制系统一起装在旋转台上, 进行常温下的地面动态联试, 考验发动机在模拟火箭转速条件下能否按照指令定时定位地发出要求的脉冲推力。

3 试验结果与分析

(1) 静态点火试验共进行 24 发, 其中重复性试验 5 发。典型的 $p-t$ 曲线见图 3。图 3 中 t_{ig} 为点火延迟时间; $t_{0.5}$ 为压力上升段和下降段上 $50\%p_{\max}$ 的点所对应的时间间隔; t_b 为装药燃烧时间; p_{ig} 为点火压力; $p_{\max}$ 为最大压力; I_p 为压力冲量, 即 $p-t$ 曲线下的面积; t_d 为 50% 冲量线对应的时间, 它可由 $p-t$ 曲线数值积分求出。

图 4 为使用同一 FTS 传感器进行多次连续测量时因传感器的热效应造成的 $p-t$ 曲线的差异。排除这种热效应后的试验结果表明: 大 L^* 脉冲发动机各内弹道性能参数的重复性好, 不象原来的小 L^* 脉冲发动机样机可能会出现点火冲击、侵蚀燃烧和其它内弹道异常现象^[2]。

(2) 动态旋转试验在 5r/s 和 10r/s 转速条件下各进行 2 发。试验结果见表 1。由表 1 看出, 两种转速下的 t_d 、 I_p 和 I (由 I_p 推算出的推力冲量) 的相对误差较大, 其中 t_d 的相对误差已超过 $\pm 10\%$ 的范围。高转速时的 t_d 、 I_p 和 I 值比低转速时的对应值明显偏小, 其原因之一可能是高转速时易将燃烧后期的薄肉厚装药甩出发动机外而使冲量减小。但是, 若用同一转速下

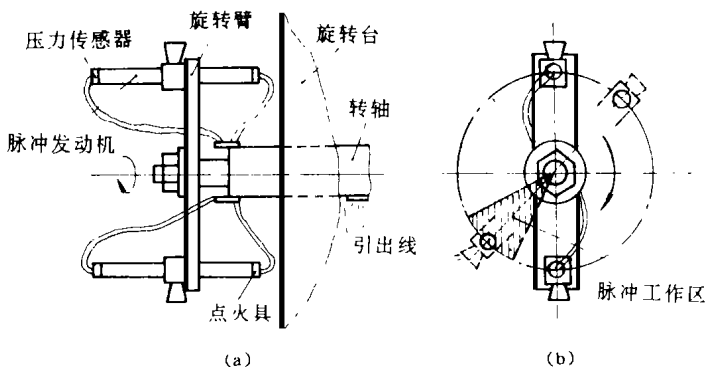


图 2 在旋转台上的安装示意图 (a 前视图 b 侧视图)

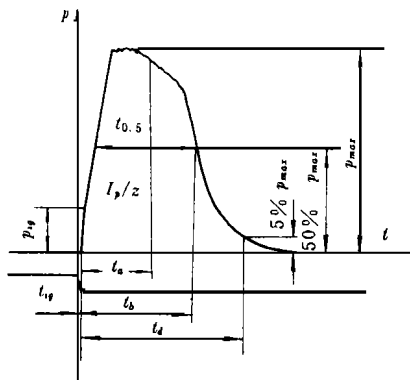


图3 静态点火试验的典型 $p-t$ 示波曲线

的参数相比较，误差就小得多（见表2）。

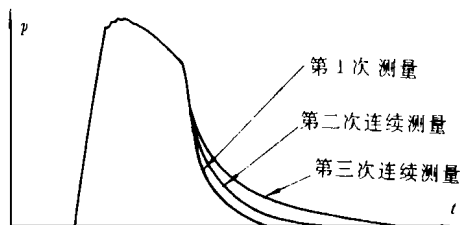


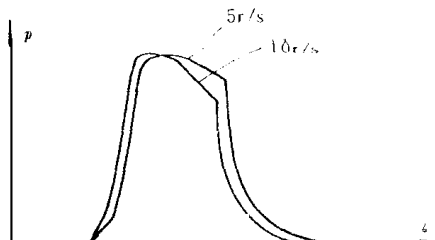
图4 用FTS传感器连续测量引起的温度效应

表1 动态旋转试验结果

序号	转速 (r/s)	t_{ig} (ms)	$t_{0.5}$ (ms)	t_b (ms)	t_d (ms)	p_{ig} (MPa)	p_{max} (MPa)	F_{max} (kN)	I_p (N·s/cm ²)	I (N·s)
1	5	0.6	19	22.5	17.20	3.0	21.8	1.26	43.62	25.19
2	5	1.0	18.5	21.0	16.13	5.6	22.2	1.28	43.46	25.10
3	10	0.8	18	20.5	13.3	4.8	21.8	1.26	37.83	21.84
4	10	0.5	18	21.0	13.0	5.8	21.3	1.23	35.97	20.77
平均值		0.73	18.4	21.0	14.9	4.8	21.8	1.26	40.22	23.23
相对误差 (%)		+ 37	+ 3.3	+ 7.1	+ 15.4	+ 20.8	+ 1.8	+ 1.6	+ 8.5	+ 8.5
		- 32	- 2.2	- 4.8	- 12.8	- 37.5	- 2.3	- 2.4	- 10.6	- 10.6

表2 同一转速下 t_d 和 I 相对误差比较

转速 (r/s)	5		10	
	t_d (ms)	I (N·s)	t_d (ms)	I (N·s)
平均值	16.67	25.15	13.15	21.31
相对误差 (±%)	3.2	0.18	1.1	2.5



动态试验结果表明，除 t_d 、 I_p 和 I 对转速较敏感外，其它参数与不旋转时的参数值并无明显变化，尤其是 p_{max} 和 p_{ig} 值更为接近，而 t_{ig} 值在高转速下略有减少。

图5 转速变化时 $p-t$ 曲线的变化

图5是因转速变化引起的 $p-t$ 曲线的变化情况。可以看出，转速由5r/s增至10r/s时， $p-t$ 曲线的上升段斜率和平稳段斜率均有一定变化，原因尚待进一步诊断。

(3) 高低温环境试验在高温+ 50℃和低温- 40℃时各进行2发。试验结果表明：同一环境温度下数据的重复性较好；环境温度变化对点火延迟和发动机冲量影响不大；高低温环境下 t_d 和 $t_{0.5}$ 的相对变化量分别为25%和40%。其试验平均值与计算值^[3]的比较见表3。

(4) 常温下的地面动态联试共进行 2 发。此时，将弹上控制系统与两台试验样机同时安装在旋转台上，控制系统按照弹体转速、样机安装位置和点火延迟等参数，适时有序地发出点火指令，要求两台样机按照规定的时间间隔分别单独工作，且它们的脉冲工作区均应位于图 2 (b) 所示的扇形区内。试验时，用光线示波器记录两台样机的 $p-t$ 曲线及其出现的时间，从而可据旋转台旋转的位置基准算出两台样机的脉

表 3 试验值与计算值的比较

环境温度 (°C)	+ 20					+ 50	- 40~ + 50
性能参数	$t_{0.5}$ (m s)	t_b (m s)	$p_{\max}$ (M Pa)	$F_{\max}$ (kN)	I (N · s)	$p_{\max}$ (M Pa)	$\Delta t_{0.5}/t_{0.5+20}$ (%)
试验值	19. 2	19. 4	22. 12	1. 28	24. 14	23. 15	40
计算值	17. 8	19. 3	20. 7	1. 283	20. 6	22. 5	42. 1

冲工作方位。同时，用摄像机连续拍摄发动机喷焰扫过的方位。上述两种测试结果都表明，两台样机工作的时间间隔满足控制系统指令的要求，且它们的脉冲工作区都位于预先规定的扇形区内，成功地实现了与弹上控制系统的地面动态联试。

4 结 论

(1) 试验测得的大 L^* 脉冲发动机的各项主要内弹道性能数据与设计值具有较好的一致性。(2) 大 L^* 脉冲发动机在各种条件下测得数据的重复性都较好，说明其工作的可靠性和稳定性好。(3) 由于大 L^* 脉冲发动机具有较长时间的压力上升段和下降段，故用 $t_{0.5}$ 来表征发动机的脉冲工作时间较合理。(4) 转速增大会使 t_d 、 I_p 和 I 有一定程度的减小，也会使 t_{ig} 有所减小，但对其它参数的影响不大。(5) 环境温度的变化对 t_{ig} 和 I 的影响不大。(6) 大 L^* 脉冲发动机能够满足系统动态联试的基本要求。

参 考 文 献

1 张平等 双管厚壁固体冲量发动机动态旋转试验的初步研究 北京: 863-409-5 推进技术概念研究文集, 1990
2 Zhang P, et al Experimental Diagnoses of Interior Ballistics Anomalies for an Impulsive T-Thruster Nashville, U SA. A IAA-92-3051, 1992
3 张平等 旋转试验用单管模拟脉冲发动机设计及内弹道性能计算 CN K88079-3, TR-03, 北京理工大学, 1990

(责任编辑 杨再荣)