

直连式冲压喷气发动机试车台 扩大试验范围的一种方法

王毓资 陈延辉

(航空航天部 31 所)

摘要: 用“离心式喷嘴加工误差造成流量偏差”的经验公式改造试车台加热器喷嘴, 提高试车台加热能力, 并对空气流量加大后的稳定段作用是否受影响及测量段的压力和温度场变化进行分析, 扩大了试车台试验范围, 满足了冲压喷气发动机的试验要求。

主题词: 冲压喷气发动机, 发动机试车台, 离心式喷嘴

A METHOD OF EXTENDING TEST RANGE OF DIRECT-CONNECTED RAMJET TEST STAND

Wang Yuzi Chen Yanhui

(The 31st Research Institute)

Abstract: The heater injector of test stand can be modified by using the experience formulation of “machining error of centrifugal injector results in flow rate error”, and heating capacity of test stand be increased, and also whether the function of stable section after air flow becoming greater is affected or not and pressure and temperature fields on measuring section be analyzed. The results show that the test range of test stand may be extended and test requirement of ramjet be satisfied.

Keywords: Ramjet engine, Engine test bed, Centrifugal injector

1 前言

在冲压喷气发动机进行地面试验中, 由于部分模拟参数值超出试车台试验能力, 需要改造试车台, 更新加热器及泵供油系统, 提高加热能力。这无疑将增加大量投入。为充分挖掘台子潜力, 经过论证, 对试车台的加热器离心喷嘴做了局部修改, 利用“离心喷嘴加工误差造成流量偏差”的经验公式, 加大喷嘴流量, 调整泵供油系统, 从而提高了供油能力。分析

结果表明, 空气流量加大后, 稳定段和测量段内流速加大, 对温度、压力测量精度的影响不大。实践证明这种小的改动, 能够满足发动机定点状态和弹道过程状态的模拟试验要求。

2 用“离心喷嘴加工误差造成流量偏差”的经验公式改造喷嘴

2.1 试车台简况

直连式冲压喷气发动机试车台系暂冲式试车台, 主气路由电动闸阀、调压阀、加热器、稳定段等组成, 加热采用四个单管燃烧室直接加热, 加热后的燃气同另一股干净空气会合后进入稳定段, 气流均温均压后经过测量段再流入发动机。

2.2 燃烧室离心喷嘴增加燃油流量数值的确定

试车台的设计最大空气流量为 45kg/s, 每个单管燃烧室最大空气流量约 11kg/s。燃烧室前总压可达 0.6MPa, 总温可达 600K。每个离心式喷嘴在主副油道同时工作情况下最大流量 $G_T = 0.107\text{kg/s}$ ($\Delta p = 6.5\text{MPa}$), 现发动机试验要求空气流量 $G_B = 72.79 \sim 85.13\text{kg/s}$, 总温为 550K 左右, 加热负荷最大状态为 $G_B = 77.79\text{kg/s}$ 、 T_∞ (总温) = 548.5K, p_∞ (总压) = 0.765MPa。显然, 如此大的空气流量, 加热器是达不到 548.5K 的。现以此状态参数值, 反推出加热器需要增加的燃油流量数值, 做为对每个离心喷嘴改造的依据, 由式:

$$G_T = \frac{G_B}{1 + \alpha L_0} \quad \alpha = \frac{\varphi_{\text{加}} \cdot H_u}{C_p \cdot \Delta T \cdot L_0} = \frac{1}{L_0}$$

其中:

G_T ——燃料质量流量

L_0 ——燃烧 1kg 燃料理论必须空气量

G_B ——空气质量流量

$\varphi_{\text{加}}$ ——燃烧完全系数

α ——余气系数

H_u ——燃料发热量

C_p ——定压比热

ΔT ——总温差

求出加热器供油量应当增加值为 0.548kg/s ($\Delta p = 6.5\text{MPa}$), 其中每一个离心喷嘴的流量为 $G_T/4 = 0.137\text{kg/s}$, 再由燃料流量公式

$$G_T = \mu \cdot f \cdot \sqrt{2g \cdot r \cdot \Delta p}$$

其中: μ ——流量系数 f ——喷嘴出口面积 r ——燃料密度

求出 $G_{T\pm} = 0.0788\text{kg/s}$, 每个喷嘴改造前后的流量差别情况见表1 (均为理论计算值)

表1

	主油路 ($\Delta p = 6.5\text{MPa}$)	副油路 ($\Delta p = 6.5\text{MPa}$)	主副油路 ($\Delta p = 6.5\text{MPa}$)
改造前喷嘴流量 (kg/s)	0.0788	0.0282	0.1070
改造后喷嘴流量 (kg/s)	0.1088	0.0282	0.1370
改造前后流量差 (kg/s)	0.1088 - 0.0788 = 0.030	0	0.030
改造前后流量差值同 改造前流量之比	0.030/0.0788 = 0.3810	—	—

由表可见,改造后的喷嘴流量要比改造前的主油路流量增加38.1% ($\Delta p = 6.5 \text{ MPa}$) 才可满足发动机试验的模拟状态要求。

2.3 用“离心式喷嘴加工误差造成流量偏差”的经验公式改造喷嘴的具体方法

依据经验公式:

$$\frac{\Delta G}{G} = 1.33 \frac{\Delta d_c}{d_c} + 1.34 \frac{\Delta d_{BX}}{d_{BX}} + 0.67 \frac{\Delta d_K}{d_K}$$

其中: ΔG ——流量偏差值

G ——流量

d_c ——喷嘴直径

d_{BX} ——喷嘴切向出口面积

d_K ——旋流器直径 (进口中心线间距离) Δd_c ——喷嘴直径偏差

Δd_K ——旋流器直径 (进口中心线间距离) 偏差值

Δd_{BX} ——喷嘴切向出口偏差值或切向出口面积偏差值。

此经验公式是将流量公式 $G_T = \mu \cdot F \sqrt{2gr\Delta p}$ 微分后,依据喷嘴几何特性 A 与有效截面系数 φ 关系,推导简化及实际测量后取得,过程从略。

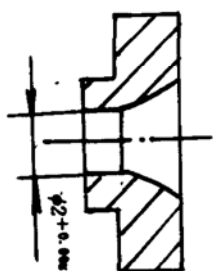


图1 改造前喷嘴直径设计尺寸

旋流器直径 (进口中心线间距离) d_K 不准准备修改。

利用试算方法将 d_c 与 d_{BX} 合理分配,确定增加量理论值: $d_c = 2.30 \text{ mm}$ 。

$d_{BX} = x \cdot \delta = 1.45 \times 0.55 \text{ mm}^2$ (梅花垫切向入口宽为1.45,厚度为0.526,取 $\Delta x = -0.09$, $\Delta \delta = 0.40$)

$d_K = 0$ 喷嘴几何特性 A 公式

$$A = d_K \cdot d_c / F d_{BX} / \pi$$

计算得改造前喷嘴 $A = 2.162$,改造后喷嘴 $A = 2.189$, A 值确定后,可确定改造后喷嘴流量系数 μ ,并以此做出压力流量曲线。

经验公式所确定的几何尺寸应视为参考值,每个喷嘴在改造前都有各自的流量曲线,应以此为基础按经验公式之结果进行改造。改造后的喷嘴除流量加大外其余性能不能降低,应按照喷嘴最初出厂的技术要求检验,诸如燃油分布的均匀性、密封性、喷射角及雾化质量、喷油锥角中心线偏移量等均应符合原喷嘴技术要求。

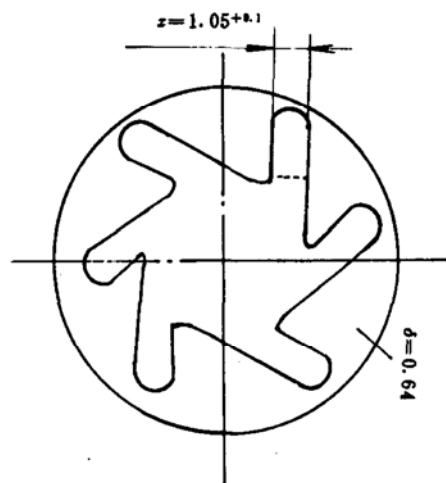


图2 改造前切向出口旋流器设计尺寸

按上述方法修改后的喷嘴理论计算压力流量曲线同修改后实测的压力流量曲线,基本吻合。喷嘴加工是一个非常细微的工作,基本采用手工操作并经实验和严格测定后完成。实例见表2、3及图3、4。

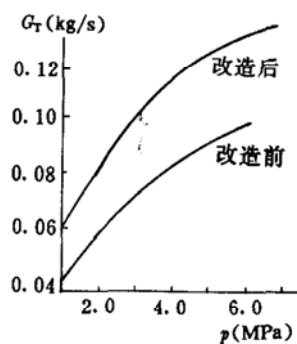


图3 7710-210号喷嘴改造前后压力-流量曲线

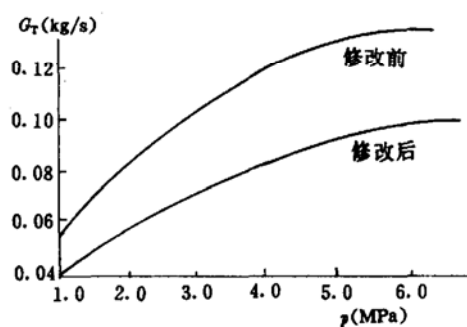


图4 73K-009喷嘴修改前后压力-流量曲线

表2 7710-210号喷嘴修改前后几何尺寸

	切向出口旋流器 (梅花垫) δ (mm)	切向出口旋流器(梅花垫) 槽宽 (mm)	主喷口直径 (mm)	喷油角度	雾化角 ($\Delta p=5.0$ MPa)	雾化
改前	0.64	$1.051^{+0.1}$	$2^{+0.018}$	75°	82°	良好
改后	0.56	1.46	2.301	75°	82°	良好

表3 73K-009喷嘴修改前后几何尺寸

	切向出口旋流器 (梅花垫) δ (mm)	切向出口旋流器(梅花垫) 槽宽 (mm)	主喷口直径 (mm)	喷油角度	雾化角 ($\Delta p=5.0$ MPa)	雾化
改前	0.64	$1.05^{+0.1}$	$2^{+0.017}$	78°	81°	良好
改后	0.56	1.48	2.30	78°	81°	良好

3 提高供油系统供油能力

由于喷嘴流量增加了38.1%,原泵供油能力不足。泵原来的最大流量为0.51kg/s,小于0.548kg/s 需要值。现对油泵进行调整:(1)提高泵入口压力,由0.06MPa上升到0.15MPa,低压油箱压力升到0.2MPa。(2)调整泵斜盘角度,出厂定为12°,现调到极限状态14°,取消最大压力限制器(地面使用是允许的),调整后柱塞泵流量增到0.56kg/s,实验证明供油系统能够满足供油要求。

4 稳定段和测量段空气流速增大的影响

4.1 对稳定段均温均压效果的影响

试车台原设计空气流量 $G_B = 45 \text{ kg/s}$, 稳定段内流速 $\lambda = 0.02$ 左右, 现 $G_B \approx 80 \text{ kg/s}$, λ 增大。通过计算 $\lambda = f_g(\lambda) = 0.03$, 同原设计 $\lambda = 0.02$ 比较, 流速增加不大, 仍为同一数量级。由于稳定段直径足够大, λ 增加不影响均温均压效果。

4.2 测量段流速增大对测温测压的影响

测量段内流速由空气流量公式算出 $q(\lambda) = 0.856$, 查表 $\lambda = 0.65$ 。

过去通常把测量段流速取在 $\lambda = 0.3$ 左右, 认为此时气流稳定测量精度高。 λ 增加后对测量影响如何呢? 从 λ 与 $\pi(\lambda)$ 关系曲线可见到, $\pi(\lambda)$ 处于曲线陡直段, λ 的微小变化反映在 $\pi(\lambda)$ 上非常明显, 所以测量时总压静压之差愈大, 测量精度愈高, 尤其在 $\lambda = 0.7$ 左右最为突出 (见图5)。当然, 稳定段出口到测量段必须有良好的流动环境。收敛段采用“维托辛斯基”公式设计, 光滑无台阶, 保证了气流稳定和测量精度。

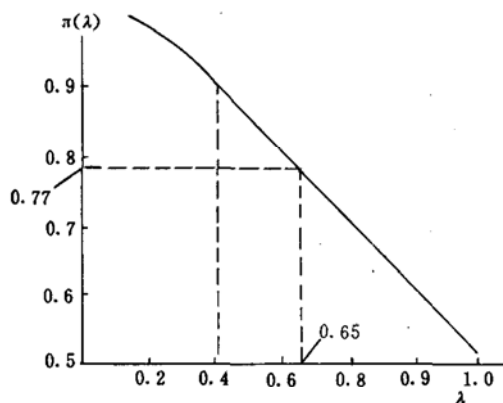


图5 $\pi(\lambda)$ 与 λ 关系曲线

No3、No6次定点状态试验压力、温度测量实况见表4和表5。

表4 No3状态

测点	1	2	3	4	5	6	7
p_{OC} (MPa)	0.766	0.763	0.765	0.762	0.767	0.766	0.765
T_{OC} (K)	551.5	555.5	558	556	543	551	551

表5 No6状态 ($t_H = -20^\circ\text{C}$ $G_B = 85.13 \text{ kg/s}$)

测点	1	2	3	4	5	6	7
p_{OC} (MPa)	0.768	0.767	0.763	0.766	0.769	0.771	0.770
T_{OC} (K)	465	467	465.5	461	461	453	456.5

根据:

$$\frac{p_{OC \max} - p_{OC \min}}{p_{OC \text{cp}}} \leq 1\%$$

$$\frac{T_{OC \max} - T_{OC \min}}{T_{OC \text{cp}}} \leq 3\%$$

与过去试验数据相比较, 测量精度没有下降。

弹道过程状态试验的温度和压力测量情况见表6

表6 弹道过程状态试验温度、压力测量情况

M 数序号	第 M_{a1} 数	第 M_{a2} 数	第 M_{a3} 数	第 M_{a4} 数	第 M_{a5} 数
p_{oc} 理论值 (MPa)	0.377	0.570	0.682	0.719	0.746
p_{oc} 实测值 (MPa)	0.402	0.502	0.662	0.702	0.752
T_{oc} 理论值 ($^{\circ}\text{C}$)	103.8	143.4	172.4	182.5	192.7
T_{oc} 实测值 ($^{\circ}\text{C}$)	109	149	171	174	190
$T_{oc理} - T_{oc实}$	5.2	5.6	-1.4	-8.5	-2.7

过程试验是一种困难的模拟试验, 很难做到 p_{oc} 、 T_{oc} 和时间的同步, 但与喷嘴改造前弹道过程试验同步情况差别不大, p_{oc} 同 T_{oc} 的变化趋势是正确的, 参数偏差值基本满足大纲要求;

$$T_{oc理论} - T_{oc实际} \leq 10^{\circ}\text{C}$$

实验结果表明, 简易设备改造, 满足了发动机实验要求。