

二元素流发生器工作性能的研究

马家驹 彭成一

摘 要

本文给出了二元素流发生器的喉道面积比和扩张角对其性能的影响,并建立喉道调节规律以指导实验者在台架上的操作。还将出口截面上脉动压力的随机统计特性和进气道出口畸变流场中脉动压力的随机统计特性进行了比较。所研究的收敛-扩散管通道形状以二斜面为主,为了探讨这种紊流发生器在产生高紊流度方面的能力,还对三斜面通道进行了实验。实验结果表明,出口截面马赫数在0.5左右时,这种紊流发生器采用二斜面通道的平均紊流度高达5%左右,三斜面通道的平均紊流度高达10%。

主题词: 喷气发动机进气道, 流场畸变, 二维流, 性能分析

一、前 言

现代军用飞机进气道往往会产生多种形式的流场畸变,因而进气道出口的气流参数极不均匀,压力、温度分布不均匀,流线也弯曲,还有气流切向分量等。这种畸变条件对涡轮喷气发动机或冲压式喷气发动机燃烧室性能和稳定的影响是新机研制中的一个重要研究课题。一台高性能发动机需在进气流场畸变的条件下进行实验,确定其对进口流场畸变的容限。为此,就要设计进气畸变模拟装置。二元素流发生器正是一种进气畸变模拟装置,它是通过激波与附面层的互相作用引起的不稳定流或者是后斜面上气流的分离来产生畸变。在六十年代末,美国通用电气公司开始研究二元素流发生器^[1]。在七十年代中期,紊流发生器开始在新机研制中应用^[2]。1978年,美国汽车工程学会S-16航空空间技术委员会编制的军用飞机进气道/发动机相容性评定规范中紊流发生器列入重要试验的设备之一^[3,4]。但是有关这方面的资料报道甚少,还未见到成熟的设计经验和设计方法。在我们的实验设备上,研究的模型通道以二斜面为主。为了探讨这种紊流发生器产生高紊流度方面的能力,还对三斜面通道进行了实验,这样研究的结果便于理解,便于应用。

本文研究了二元素流发生器主要几何参数对其性能的影响,并绘制了喉道调节规律曲线,以指导有关实验者在试车台上的操作,将会大大缩短调试的时间。

实验设备和测量方法见文献^[5],在此不再赘述。有不同的是脉动压力的 *rms* 值采用了打印记录。

二、模 型 设 计

二元素流发生器的收敛-扩散管通道可由二斜面和三斜面组成,见图1。通道上壁一般设计成水平面;通道下壁由铰接的二斜板或三斜板组成,其位置可以调整。因采用参变实验研

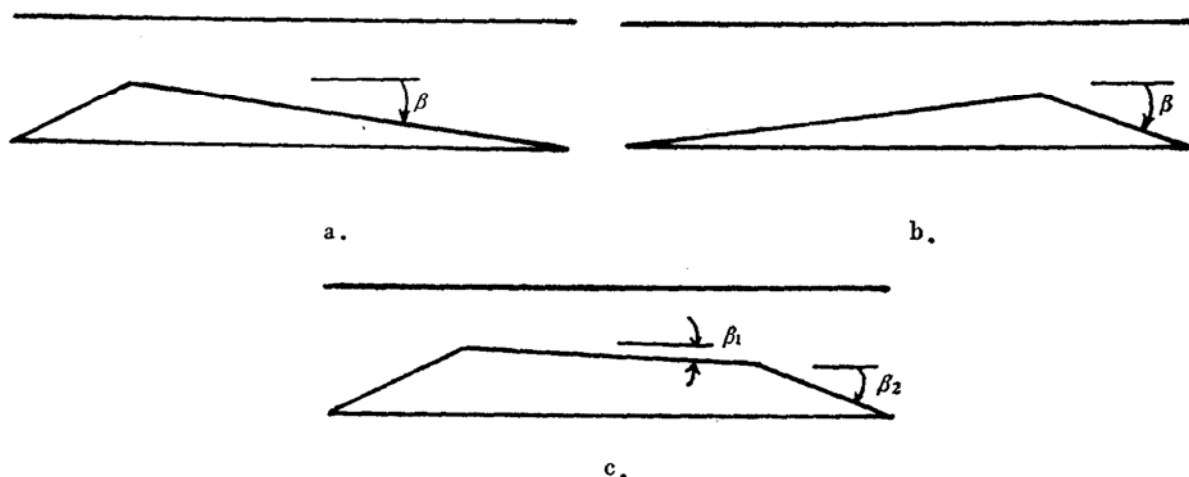


图1 模型通道形状

a. 二斜面前置喉道 b. 二斜面后置喉道 c. 三斜面

究的方法,如图1a所示模型的面积比(喉道面积与出口面积之比) A 取值为0.45、0.50、0.55和0.60,代号分别为F45、F50、F55和F60。如图1b所示模型的面积比和代号同理为AF55、AF60、AF65和AF70。由缩尺比的要求确定模型通道最大矩形截面为 $70 \times 70 \text{ mm}^2$,圆截面直径为80mm和总长度为400mm。前、中、后三块铰链板长度的确定要考虑在适当的波前马赫数 M_s 情况下,结尾激波到模型出口截面的尺度尽可能小,则紊流度大。紊流度的定义是脉动压力均方根值除以截面平均总压,或表示为 $Tu = \Delta Prms / P_{av}$,同样面平均紊流度为 $\overline{Tu} = (\Delta Prms)_{av} / P_{av}$ 。采用如图1c所示三斜面通道时,还要保证适当的扩张角 β_1 。过去研究表明, $\beta_1 = 0.5^\circ$,沿流程附面层的发展足以抵消通道的扩张作用; $\beta_1 = 1^\circ$, M_s 达不到要求值。因而 $\beta_1 \geq 2^\circ$ 为宜。

F系列模型用于超临界工作状态,AF系列模型也可用于超临界工作状态,但是以亚临界工作状态为主。二斜面通道便于在试车台上进行通道形状的调整。三斜面通道喉道永远是前置的,其优点是不仅可以调整喉道面积,还可以独立地调整喉道下游的扩张角。

三、实验结果与分析

1. 二斜面模型出口流场的性能

(1) F和AF系列模型的稳态总压恢复系数 σ 、流场不均匀度 $\overline{D}$ 和动态压力的面平均紊流度 $\overline{Tu}$ 的变化规律

图2~4给出了这类模型的 σ 、 $\overline{D}$ 和 $\overline{Tu}$ 随面平均马赫数 M 的变化规律。在一定喉道面积比 A 情况下, σ 随 M 增大而下降, $\overline{D}$ 和 $\overline{Tu}$ 随 M 增大而上升。

从这些图中以及我们所做的大量试验结果中可以看出,各模型的 σ 、 $\overline{D}$ 和 $\overline{Tu}$ 随 M 的变化是一致的,唯独周向畸变指数DC60随 M 的变化有时得不到良好一致的规律。DC60变化之所以这样,可能是因为分离流对外来的影响过分敏感,总压图谱难免带有一定的不稳定性和随机性。这里 $\overline{D}$ 的定义是截面上最高总压与最低总压之差除以截面平均总压。DC60的定义是在 60° 扇形面积内最低平均总压减去截面平均总压除以截面平均动压。在某一确定的 M 下,只需调整喉道面积,就能得到不同的 σ 、 $\overline{D}$ 和 $\overline{Tu}$ 。

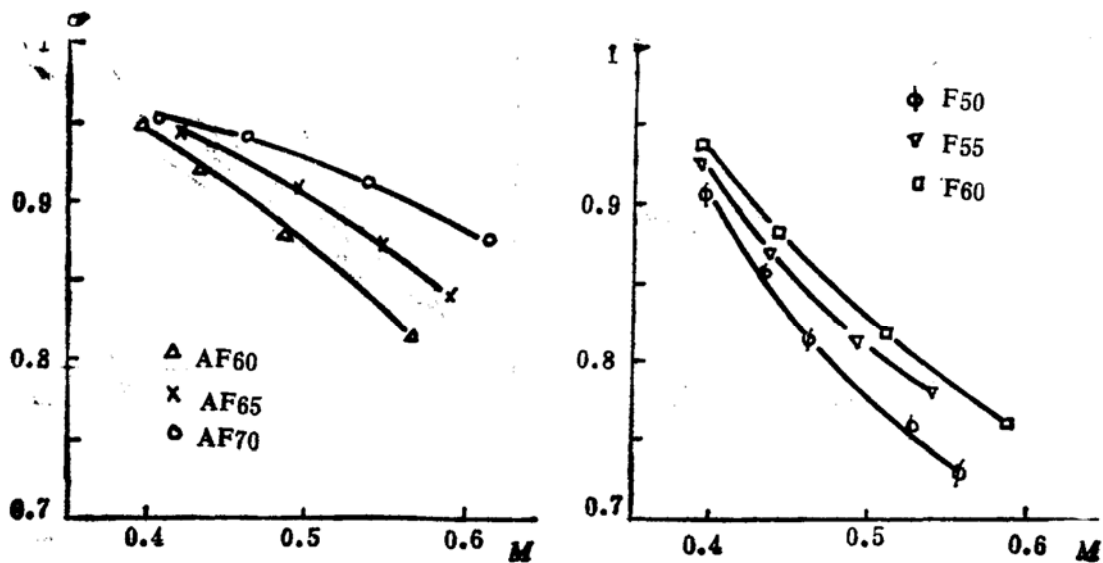


图2 σ 与 M 的关系

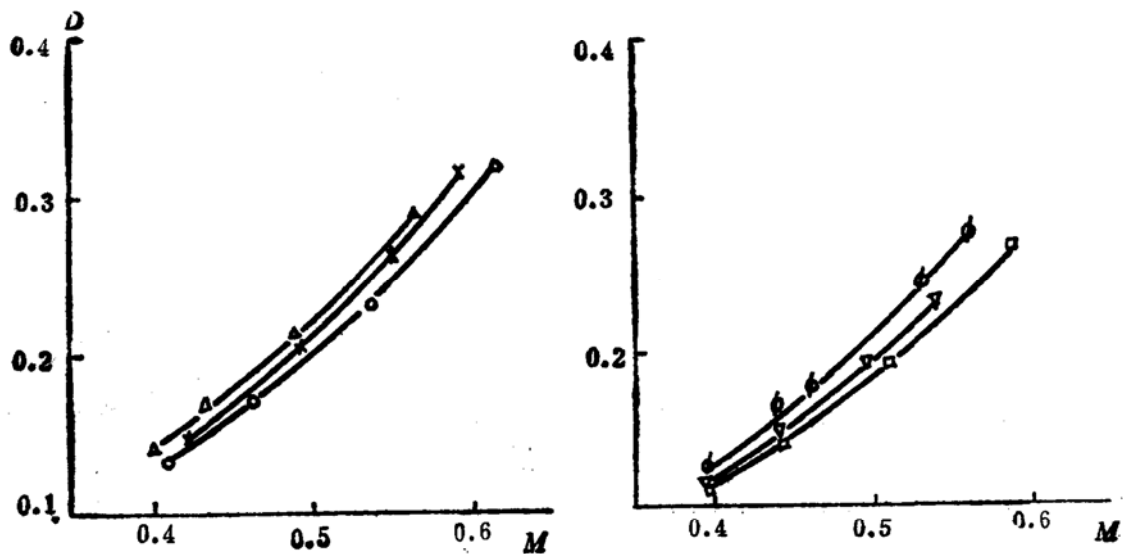


图3 $\bar{D}$ 与 M 的关系

(2) F和AF系列总压和紊流度分布特点

图5给出了F60和AF55模型出口 $M \approx 0.5$ 时的总压和紊流度分布图谱。分析图谱可知,有径向和周向压力畸变,图5a上总压恢复高区居中偏下(时钟6点);图5b上总压恢复高区居中偏上(时钟12点)。可是,高总压恢复区中心的紊流度都偏低,是良好的流动区。在高总压恢复区和低总压恢复区之间有一个高动态压力带。总压和脉动压力紊流度的图谱与文献〔6〕图9所示的特点颇为一致。

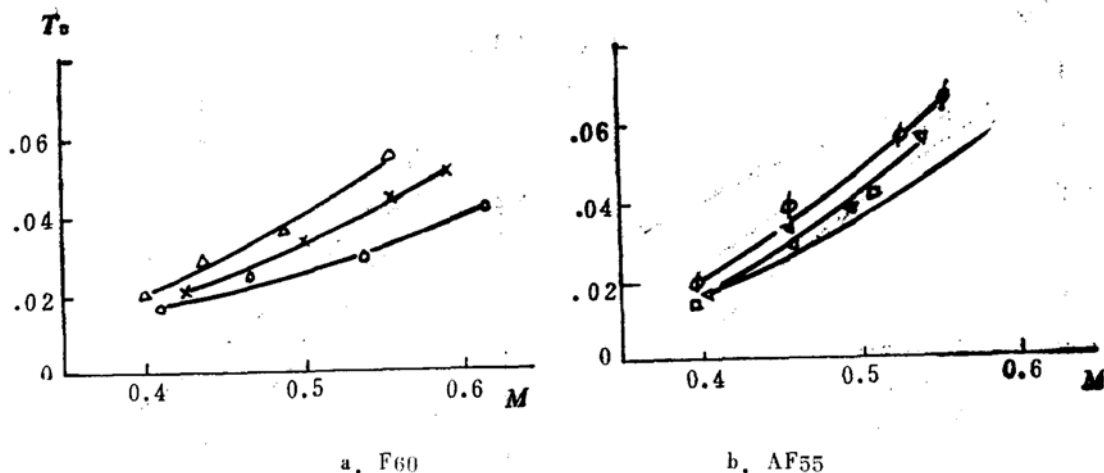


图4 $\overline{T_u}$ 与 M 的关系

当面平均马赫数 M 在 $0.4 \sim 0.6$ 范围内增大时, 上述稳态总压图谱上的高总压恢复区 仅稍有扩大, 低总压恢复区逐渐变大, 中总压恢复区有些收缩, 这样面不均匀度 $\overline{D}$ 就增大; 脉动压力的紊流度各区域的值都有不同程度的增大, 它们的分布以上面提到的高动态压力带来看, 那是明显增长, 因而性能图上 $\overline{T_u}$ 随 M 增大而增大。

以上实验未考虑畸变网的影响。当使用畸变网时, 应针对这一影响作修正。

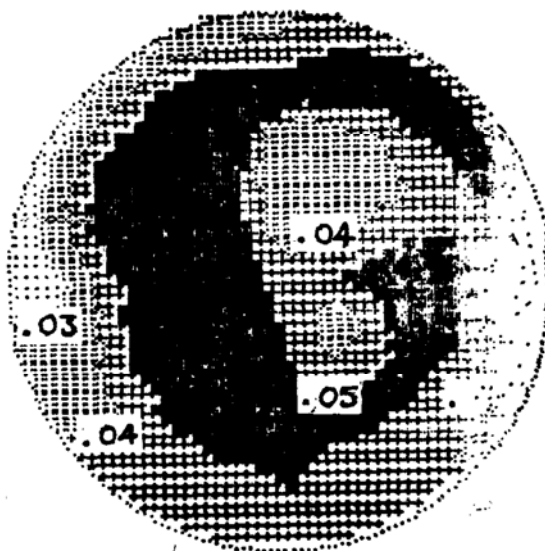
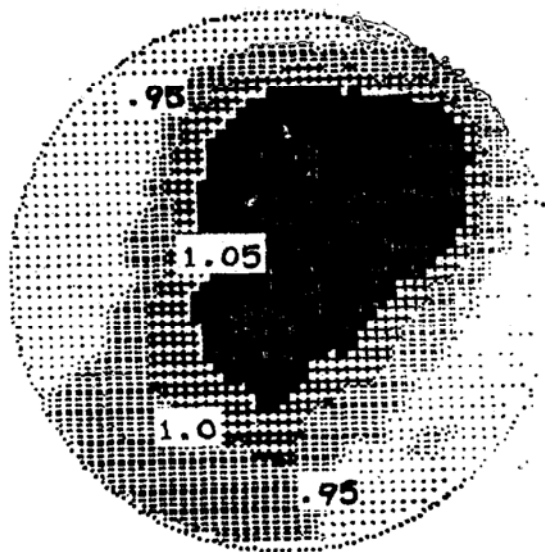
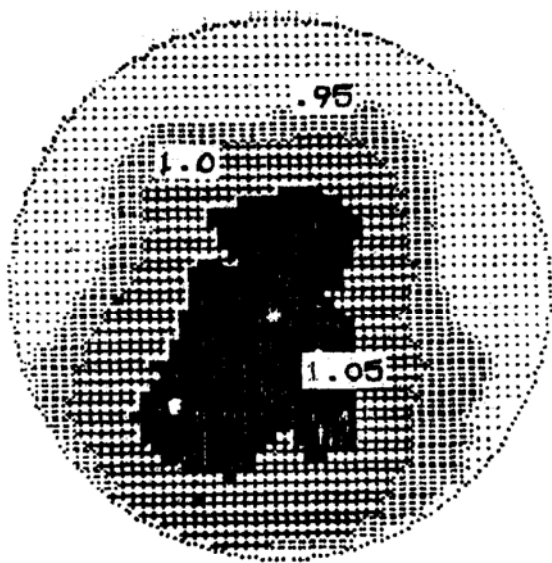
(3) 脉动压力的均方根值 $\Delta Prms$ 的分布、概率密度和功率谱

$\Delta Prms$ 是气流压力脉动幅值的度量, 它除以截面平均总压, 就代表该点的紊流度 T_u 。由于地面车台上在一定状态下气流在截面上的总压是统计平稳的, 平均压力并不随时间变化, 因此均方根值的分布也可以代表紊流度的分布。图5下半部两个图谱是 F60 和 AF55 模型出口 M 为 0.5 时的 $\Delta Prms$ 分布。

由 Kulite 动态压力传感器来的脉动压力信号放大后接到低通滤波器消除不必要的高频分量, 由真值均方根表输出, 经打印记录 $\Delta Prms$, 截止频率取 5kHz 。或者, 由低通滤波器输出的脉动压力信号直接送到 CF-920 进行动态分析, 得到如图6所示概率密度和功率谱。由图可见, 这种紊流发生器出口流场脉动压力的概率密度近似正态分布, 其能量主要在 2.2kHz 以内。由于进气道出口的脉动压力一般为正态随机分布, 以及文献[1]图22所示模拟器和进气道的功率谱与本实验所得功率谱比较一致。这就表明, 紊流发生器不仅模拟了脉动压力的 rms 分布, 而且模拟了它的能谱。

2. 三斜面通道出口的流场的性能

图7给出了这种模型代号为4050、 $M = 0.5$ 时出口流场的稳态总压和动态压力的紊流度分布。这里的模型代号的第一、二位数字代表紊流发生器喉道与出口截面之比 A ; 第三、四位数字代表喉道下游斜面转折处的截面与出口截面之比, 它的选择就决定了喉道下游通道的扩张情况。该图的 $\sigma = 0.709$, $\overline{D} = 0.528$, $DC60 = 1.04$ 和 $\overline{T_u} = 0.098$ 。再举一个代号为5060的模型, 其 M 与4050相近时的流场数据为: $\sigma = 0.709$, $\overline{D} = 0.523$, $DC60 = 0.739$ 和 $\overline{T_u} = 0.115$ 。这就表明, 三斜面通道模型由于可以灵活调整喉道下游的第一扩张角 β_1 , 使 σ 下降, 激波位置大幅度向下游移动, 从而可以提供很高的紊流度。但是, 高的紊流度伴随着大的总压损失和大的稳态畸变。



a. F60

b. AF55

图5 二斜面型出口流场

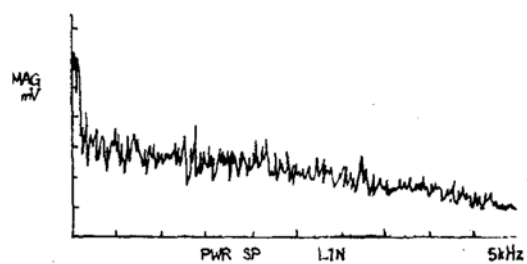
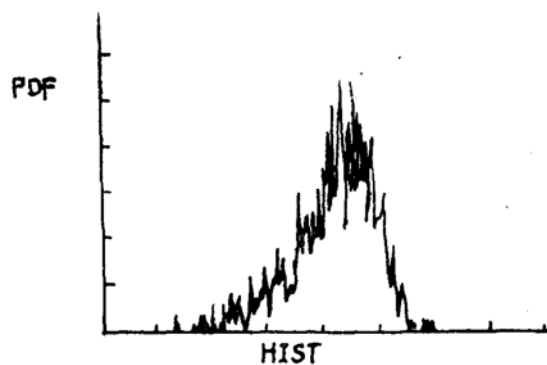


图6 二斜面模型出口脉动压力的统计特性

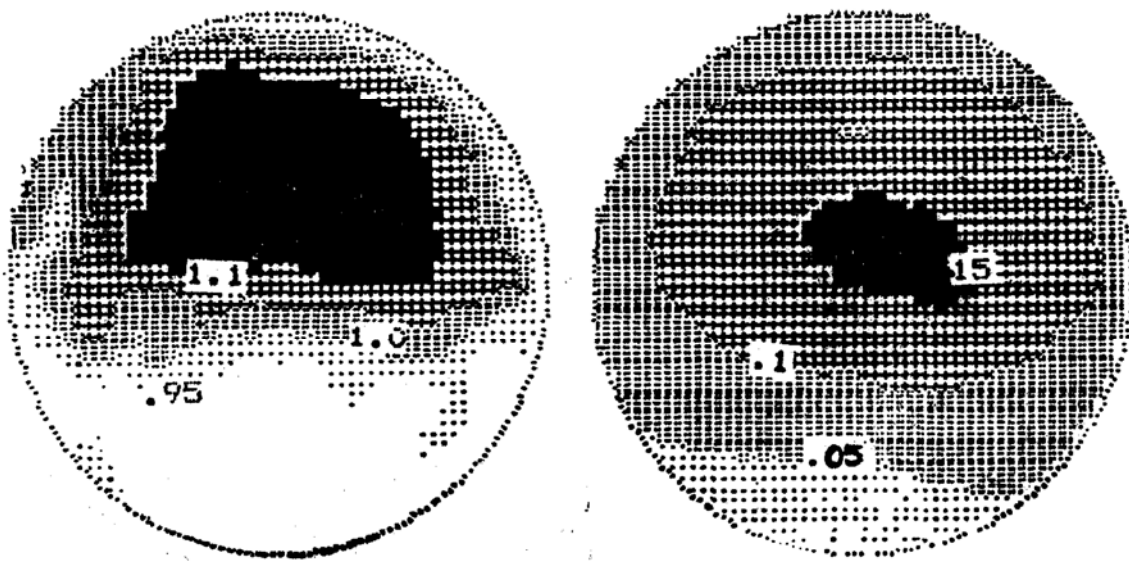


图7 三斜面通道出口流场

3. 二元素流发生器的调节规律

从F和AF系列模型实验所得的性能曲线上读取 M 数为常数时的数据,并将这些数据绘成

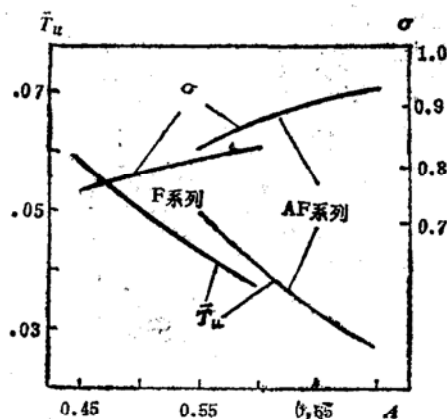


图8 二斜面通道出口流场的 σ 和 $\overline{T_u}$ 随 A 的变化关系

以喉道面积比 A 为横坐标的曲线,见图8,即得到称为调节规律的曲线。这些曲线表明,欲使 σ 或 $\overline{T_u}$ 达到某一模拟要求的数值,应该将 A 向哪个方向调,调到何处。本文中仅给出 M 为0.5的一组曲线。在实际工作中,应当绘制更多组曲线备用。这些曲线不可能把畸变网的影响包括进去。因此,在使用畸变网的情况下,调节规律曲线提供的指导是定性的而不是定量的。

下面简要介绍模拟一个具体流场的工作步骤。从而可以看到调节规律曲线所起的重大作用。

1. 根据目标流场的 $\overline{T_u}$ 量级,高总压恢复区位置(是居中还是偏向一边),及高 $\overline{T_u}$ 对应

于高总压恢复区还是低总压恢复区,初步选定通道类型及几何参数。

2. 在二元素流发生器模型上对上述通道进行实验,并对几何参数加以调整。

3. 设计畸变网或板,放在紊流发生器上进行实验。

4. 运用调节规律中的 $\overline{T_u} = f(A)$ 曲线,调节 A 。

5. 对调节后的 σ 应作出估计,以便在实验时将测量截面的静压调到按所要求的 M 数计算出的静压值。录取全部实验数据。

(下转第56页)

验。低温推进剂的在轨再加注研究,尚处于初期的理论、方案探索阶段,仅作了一部分地面试验,未达到飞行论证的阶段,可实用的资料较少。

因此,为了今后建立我国空间站,必须开展在轨再加注系统的研究,及对个别重要部件的预研工作。

参 考 文 献

- (1) AIAA 84-1342.
 - (2) AIAA 85-1233.
 - (3) AIAA 84-1343.
 - (4) JBIS Vol.38 PP.381~385,1985.
 - (5) AIAA 85-1234.
 - (6) AIAA 79-1262.
 - (7) NASA CR-159722.
 - (8) IAF 86-63.
 - (9) NASA CR-159404.
-

(上接第6页)

6. 对数据进行处理,检查所获流场与目标流场之间的差别。修改畸变网或板,以调整 $\bar{D}$ 和DC60。

7. 重复步骤3至6,直到满意为止。

至此已经完成了模型实验工作。在高空舱进行实物实验时,方法与模型实验步骤3至7相同。

四、结 论

1. 若模拟流场的平均紊流度不超过5%,本项研究指出二元素流发生器通道形状采用二斜面已能满足要求,而且总压损失不太大,稳态畸变适度以及台架调节方便。若平均紊流度在10%左右,三斜面通道的紊流发生器可以提供这种高紊流度的流场,但是伴随着大的总压损失和大的稳态畸变。

3. 进气流场畸变试验中运用调节规律曲线操作紊流发生器,可大大缩短调试的时间。

参 考 文 献

- (1) Younghans, J.L., Moore, T.M., Collins, T.P. and Dierenzi, J.G.: Inlet Flow Field Simulation Techniques for Engine/Compressor Testing Aircraft Engineering, November 1970.
- (2) Anderson, R.E.: Aircraft Engine Inlet Pressure Distortion Testing in a Ground Test Facility, AIAA-83-1233, 1983.
- (3) SAE Aerospace Recommended Practice NO.1419, 燃气涡轮发动机进气道总压畸变考虑.
- (4) SAE Aerospace Recommended Practice NO.1420, Gas Turbine Engine Inlet Flow Distortion Guidelines, March 1978.
- (5) 彭成一, 马家驹: 二元素流发生器实验研究.《航空学报》, 第8卷第2期, 1987.
- (6) Bowditch, D.N. and Coltrin, R.E.: A Survey of Inlet/Engine Distortion Compatibility (Invited Paper), AIAA-83-1166, 1983.