

二元超音速进气道唇口分离 流动及其控制

何中伟 张世英 李君山 陈金冲

摘 要

本文着重研究了几种唇口内侧壁面分离流动控制结构对进气口流场、几何喉道下游邻近的截面的流场及其壁面附面层参数和进气道出口流场和性能的影响。文中并比较了唇口分离流吹除之后对进气口再附着下游截面上的总压脉动压力均方根值分布及功率谱密度——频率特性。

符 号 表

A	通道截面积	δ	附面层厚度, mm
H	通道高度, 附面层形状因子	δ^*	附面层位移厚度, mm
$\dot{m}$	进气道流量	θ	附面层动量厚度, mm
$\dot{m}_{bl}$	分离流抽气量	$\Delta p_{t, rms}$	总压脉动的均方根值, Pa
N	$\frac{U}{U_\infty} = \left(\frac{Y}{\delta}\right)^{\frac{1}{N}}$ 中的幂指数 N	PSD	功率谱密度
P_0	大气压	ω	频率, HZ,
P_t	总压	C_μ	吹除系数 ^[7]
P_s	静压	注脚:	
X	通道沿流动方向的座标	τ	喉道
Y	通道高度方向的座标	2	进气道出口
DC ₆₀	进气道的稳态畸变	SEC	截面
φ	进气道的流量系数	BL	附面层

一、引 言

超音进气道在起飞状态下, 由于尖唇口形状, 唇口内侧要产生严重的分离。这种分离使进气道性能恶化, 畸变增大^[1,2]。如何对唇口分离流进行控制, 文献[3,4,5]做了多方面的工作。提出了在大攻角和起飞状态下唇口分离流的控制效果及对进气道出口截面的稳态畸变、紊流度的改善; 并就唇口分离流动对其下游的脉动静压和总压的影响, 作了相干分析。

本文侧重于探索二元超音速进气道在起飞状态下唇口吸除和吹除方法及控制结构, 对进气口流场的影响, 包括对沿进气口流向、沿进气口高度的总压剖面, 对几何喉道下游邻近截面的流场及其壁面附面层参数, 以及对进气道性能和流场畸变的影响。文中并就唇口分离流

及其控制对分离流再附着点下游的总压脉动均方根值沿进口高度方向的分布及功率谱密度-频率特性作了比较,得出了有参考价值的结论。

从流谱观察和进气口的稳态流场的详细测量中发现,斜切口超音速进气道在起飞状态下,其尖唇口内侧的分离流动,进气口前方的气流流动方向,进气口沿高度的总压剖面,与二元超音速进气口在跨音速大攻角下的流动十分相似^[4]。因此,本文对唇口分离流采取控制方法,及其研究结果对于研究二元超音速进气道在跨音速大攻角下的唇口分离流控制,也具有一定的参考价值。

二、实验模型

实验模型为双波系二元外压式超音速进气道(图1)。其设计马赫数为1.75,进气口压缩面的倾角为 7° ,外倾角为 15° 。进气口外罩唇口内表面的倾角为 5° ,故进气口通道略呈收敛形。唇口外表面倾角为 13° 。进气道几何喉道尺寸为,高度42mm,宽度70mm,喉道等截面长度为36mm。

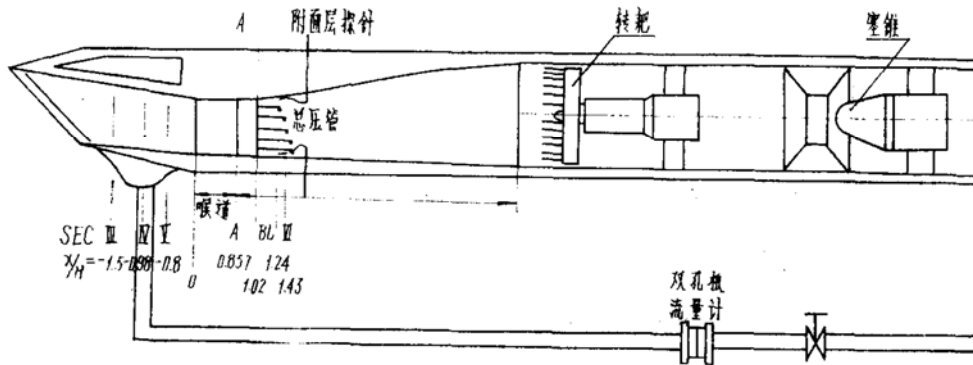


图1 二元超音速进气道模型

几何喉道下游的亚音速扩压器之扩压比为 $A_2/A_1 = 3.2$ 。扩压通道形状实行由矩形逐渐过渡成圆形,其当量扩压角,从喉道出口到进气道出口,基本上保持 7° 。但是,靠近压缩面一边的通道壁面的局部扩压角较大,最大局部扩压角达 10° ;而唇口一侧的扩压器壁面的局部扩压角较小,最大的也只有 3° 。进气道通道的面积分布如图2所示。

进气口外罩唇口内侧壁面是分离流的主控制区。侧壁设计成插入式的板壁,易于更换其结构。唇口内侧壁的分离流可以通过外罩的内、外壁所构成的腔道被抽吸走,或由外界引入射流,吹除唇口分离流。外罩唇口内侧壁上设计有七排直径为0.6mm的42个静压孔,借以配合进气口流场的总压管,测定和观察唇口内侧的分离区范围和流场(图3)。

在距离几何喉道出口截面7mm处,设计有五根总压探针,为了防止探针杆对进气口气流的堵塞,测量时每一根总压探针是单独操作的(图1)。

在距离几何喉道出口截面为16mm处,设计有附面层探针,分别测量该截面上壁和下壁的附加层参数。探针的结构和形状是参照文献[6]制作的。探针口的总高度为0.14mm,宽度为1mm,探针口内高为0.10mm。探针的测量起点采用电触法显示,一旦探针离开被测壁面,指示灯灭。

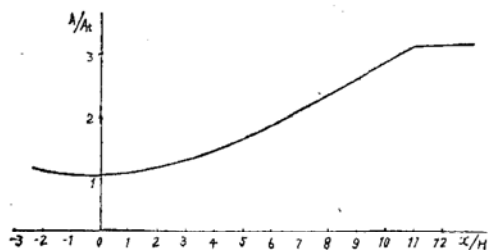


图2 进气道通道的面积分布

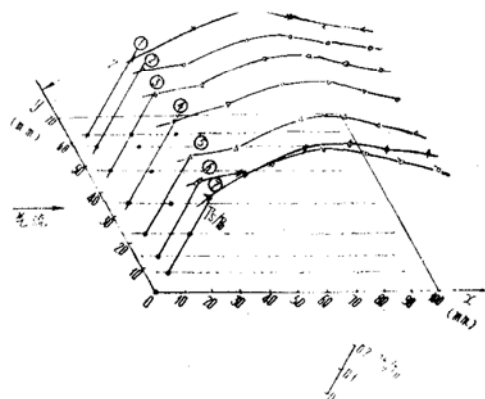


图3 唇口内侧壁面静压分布
(BC板, $\varphi = 0.849$)

进气道口的几何喉道上设计有四个直径为0.6mm的静压孔,分别位于几何喉道中段上、下、左和右壁面。

进气道的出口截面装有具有12根总压管的一字型转耙。先后照每15°转角采集一次数据。

在进气口的Ⅲ、Ⅴ截面,分别安装有总压探针,探针的测点步长为1mm和2mm,近壁小,离壁较远时大。在进气口的Ⅳ截面,装有动态和稳态的组合式总压探针,动态探针装有Kulite传感器,参照文献〔8〕设计而成。

实验时进气道的流量由转耙下游远方的带移动中心锥的喷管进行控制。实验时,使喷管在超音速下工作,以防止转耙受到气流的扰动干扰,而影响测量数据。喷管的中心锥是由步进电机控制的。

实验时外罩唇口内侧分离流的吸除量或吹除量是由预先经江苏省省计量站标定的双孔板流量计测量的。

三、测量系统

稳态压力测量系统由SYD-1传感器, XJ-100巡检和LS-5打印机组成。经标定,传感器精度为0.3%。

动态压力测量系统由图4所示框图构成。采集数据时滤波器的截止频率为10kHz。

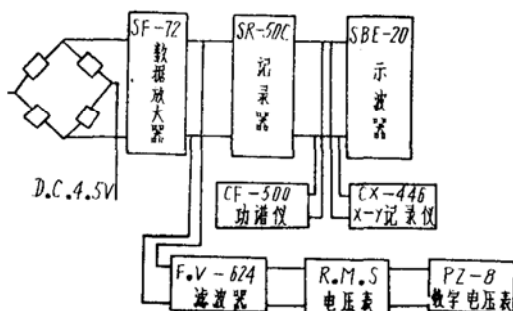


图4 动态压力测量

四、进气口的分离流动状态及其控制板形状

1. 图3提供了二元尖唇口超音速进气道在起飞状态下的进气口唇内侧壁面静压分布及进气口流态。(BC板。 $\varphi = 0.849$)。

流谱试验以及相配合的唇口流场测量结果表明,在流量系数 $\varphi = 0.849$ 下,于唇口前缘内侧壁面形成一个十分强烈的分离区。分离区的长度约42mm,高度约10mm。而进气口气流在分离泡的再附点之后,以 $30^\circ \sim 70^\circ$ 方向朝压缩面方向折转,向几何喉道流去。再附点后的气流与进气口分离泡上方气流构成明显的剪切层界面。有趣的是,这剪切层大约同唇口内表面形成 25° 倾角,并且逐渐靠近压缩面。在压缩面的前缘,进气口气流也形成一小分离泡。这样斜切进气口由于压缩面前缘和唇口内侧面前缘形成了分离泡。而构成一个特殊的气动进气口,使进气口前方的气流以一相当大的攻角进入进气口。

2. 测量的结果表明,二元尖唇口超音速进气道在起飞状态下的进气口内通道气流沿高度和流向的总压分布特征,与二元进气道在跨音速大攻角下的进气口内通道的气流总压分布特征很相似[4]。

3. 唇口内侧壁的分离流控制板结构:为了降低进气道进气口内通道的流场畸变,提高气流在进气口内的总压恢复,分别对唇口内侧分离流进行吸除或吹除。各种吸除、吹除和基本板(即不吸除和吹除)形状见图5、6、7。BC代表基本板。

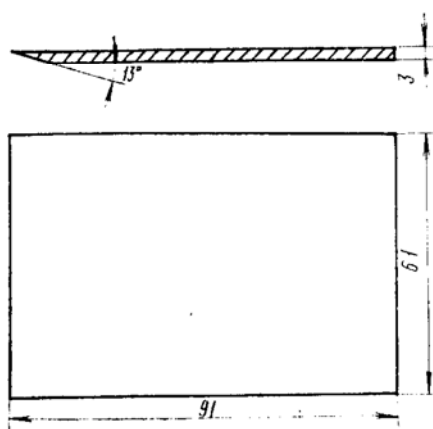


图5 BC板

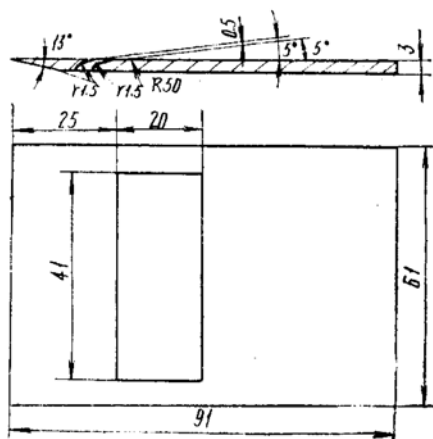


图6 F板

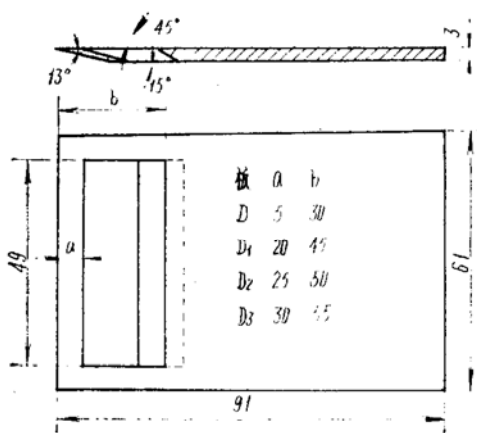


图7 D系列板

五、试验结果和讨论

1. 不同的唇口分离流吸除结构对进气道进口通道内气流沿高度和沿流向的总压分布的影响。

实验中设计了几种唇口分离流吸除结构,有唇口壁面开 15° , 45° , 60° 斜孔,有开 15° 斜

槽的。图 8 比较了基本板 BC 与 D 系列吸除板的总压恢复沿流向和沿高度方向(取 III、V 截面)的变化。

由实验结果可以看到, 采取 D 系列的吸除板所表示的唇口壁面分离流吸除结构, 明显地提高了进气口通道下半区(对 III 截面, 在 $Y/H = 0.4$ 以下, 对 V 截面, 在 $Y/H = 0.48$ 以下)的总压恢复。相结合的流谱试验结果表明, 上述通道下半区的总压恢复的提高, 与采取了唇口壁面分离流吸除后的气流方向密切相关, 气流(转压缩表面的)流动倾角明显减小, 尤其是 D_3 板更为明显, 而唇口分离区大大缩小。试验结果如图 8 A, B 所示。

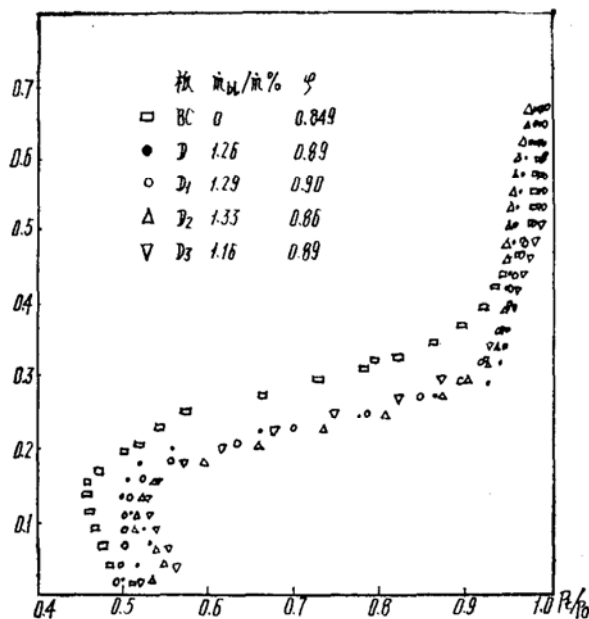


图 8 A $P_3/P_0 - Y/H$ (SEC. III)

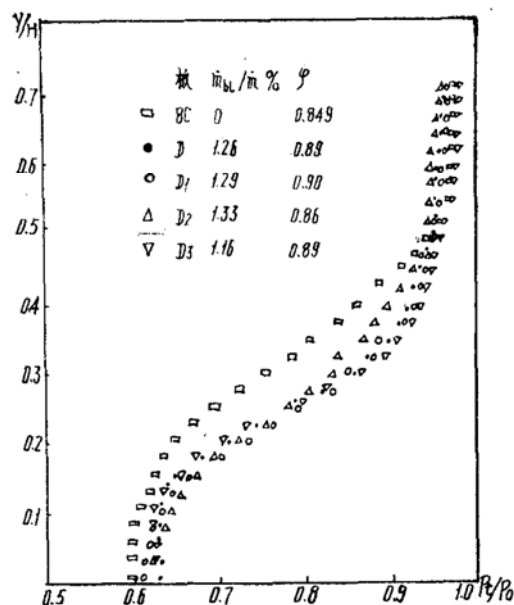


图 8 B $P_1/P_0 - Y/H$ (SEC. V)

2. 不同的唇口分离流控制板结构对进气道几何喉道下游A截面上流场的影响

对比图 9、10 和 11 中所给出的 BC 板, D_3 板和吹除板 F, 三种分离流控制结构所获得的 A 截面的总压恢复场, 我们发现, 采取了 D_3 板和 F 板控制结构, 可扩大 A 截面的高总压区, 压缩了 A 截面下半部的低总压区。这种结果与图 8 的试验结果一致。

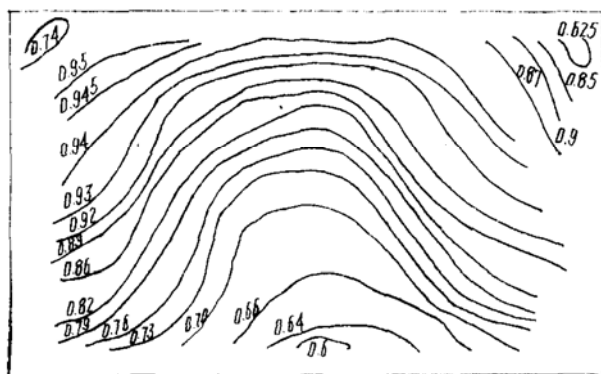


图 9 A 截面总压恢复场 (BC 板 $\varphi = 0.849$)

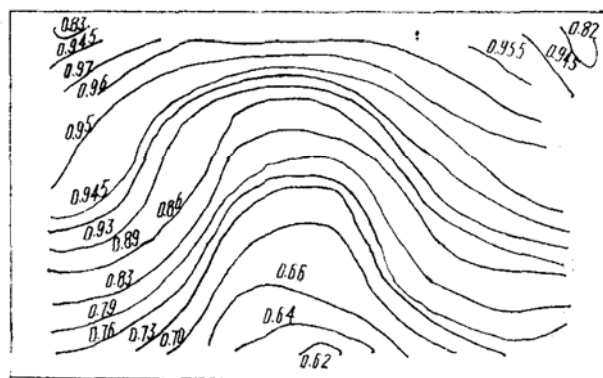


图 10 A 截面总压恢复 (D_3 板 $\varphi = 0.89$)

3. 不同的唇口分离流吸除结构对几何喉道下游邻近截面 BL 的附面层参数的影响

根据表 1 中所列举的各种唇口分离流控制板与基本板 BC 的实验结果, 我们可以看到, 采取 D 系列板的抽气结构, 在抽气量约为 1~1.4% 下, 均使下壁的附面层厚度 δ , 位移厚度 δ^* , 动量厚度 θ 以及附面层形状因子 H 下降了, 并使附面层的速度分布指数 N 提高了。此外, 在某种程度上也使上壁附面层的参数向有利的方向变化。

4. 唇口分离流控制对进气道出口总压恢复和流场畸变的影响

表 2 中比较了几种唇口分离流控制结构, 包括吸除和吹除结构对进气道出口总压恢复和

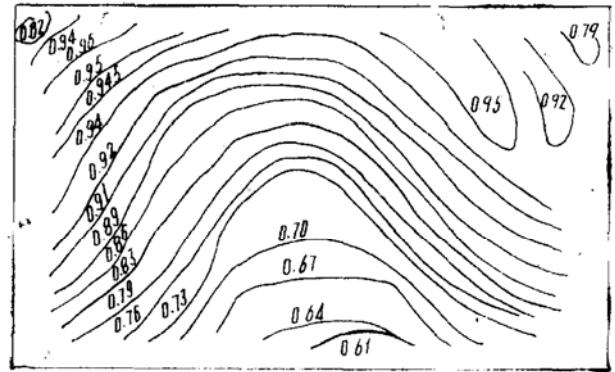


图11 A截面总压恢复分布(F板 $\varphi = 0.9025$)

表 1 壁面附面层参数比较

板	$\dot{m}_{hl}/m\%$	φ	B. L 探针 NO	δmm	$\delta^* mm$	θmm	H	$V_{\infty} m/sec$	N
B C	0	0.849	上	3.32	0.685	0.408	1.678	315.6	3.52
			下	3.57	0.714	0.453	1.57	217.1	3.855
D	1.08	0.898	上	2.9	0.67	0.42	1.60	302.8	3.63
			下	2.65	0.42	0.29	1.44	185.4	5.4
D ₁	1.29	0.904	上	2.98	0.49	0.344	1.44	301	5.26
			下	2.40	0.47	0.319	1.48	186	4.7
D ₂	1.40	0.858	上	2.9	0.43	0.30	1.43	301	5.9
			下	2.4	0.42	0.29	1.43	176	5.22
D ₃	1.16	0.89	上	2.90	0.518	0.345	1.49	293.5	4.62
			下	2.48	0.479	0.327	1.46	190.8	4.68

表 2 进气道性能比较

板	$\dot{m}_{hl}/m\%$	P_{t2}/P_0	-DC ₆₀	φ
BC	0	0.7541	0.7517	0.849
D	1	0.7662	0.4836	0.898
D ₁	1.29	0.7663	0.4842	0.904
D ₂	1.3	0.7639	0.5803	0.8581
D ₃	1.16	0.7693	0.7078	0.89
F	$C_{\mu} = 0.00229$	0.7628	0.3993	0.9025

流场畸变 DC_{60} 的影响。表2中的数据表明,吸除唇口分离流明显地提高了进气道的总压恢复,由0.754增加到0.769,降低了进气道出口的流场畸变,由 $DC_{60} = -0.75$ 降到 $-0.70 \sim -0.48$,而所需要的抽气量 $m_{b1}/m = 0.01 \sim 0.013$ 。采用F吹除板,互吹除系数 $C_{\mu} = 0.00229$ 下,总压恢复由0.754提高到0.762。而稳态流场畸变由 $DC_{60} = -0.7517$ 降为 -0.3993 。

对BC板、 D_3 板和F板三种结构的进气道流场分析后发现,采用 D_3 板后,整个进气道出口截面的总压恢复均提高了(图13),采用F板结构后,进气道出口截面上部、左、右部分

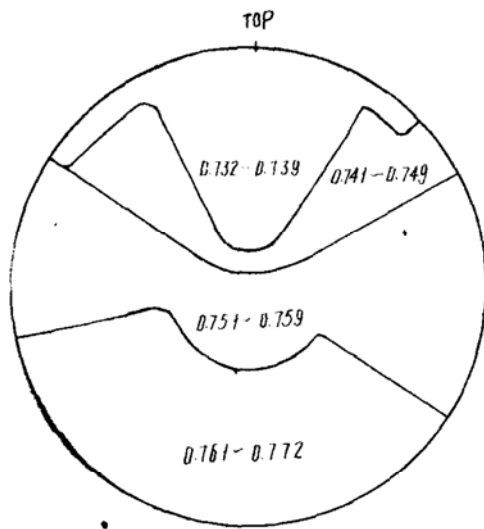


图12 进气道出口总压恢复场
(BC板 $\varphi = 0.849$)

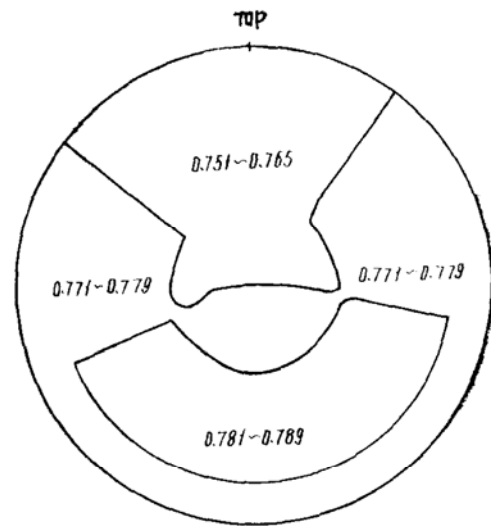


图13 进气道出口总压恢复场
(D_3 板 $\varphi = 0.89$)

总压恢复提高了,而且流场更为均匀(图14)。

5. 比较BC板、 D_3 板和F板下的进气口气流的总压脉动均方根值分布特征

图15比较了BC板、 D_3 板和F板三种唇口内侧壁面结构产生的进气口通道内分离流再附点

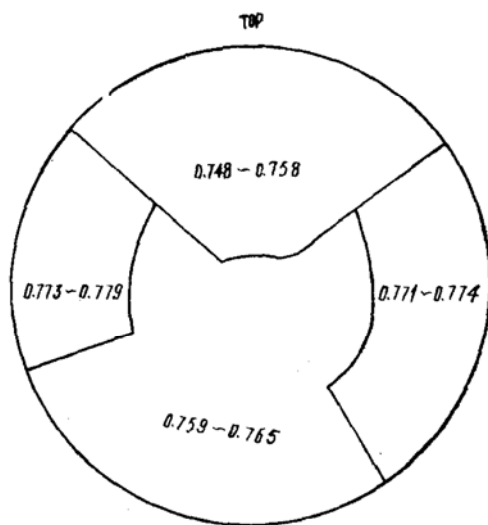


图14 进气道出口总压恢复场 (F板 $\varphi = 0.9025$)

下游第V截面上的气流总压脉动均方根值的变化特征。三种结构的 $\Delta p_{t, rms} - Y/H$ 分布表明,在距内侧壁面的某一高度,均存在一个最大 $\Delta p_{t, rms}$ 值。对BC板来说,这个最大值较其它 D_3 、F板的最大值距壁面要远些。其次吹除和吸除分离流,大大降低其 $\Delta p_{t, rms}$ 值,不仅降低其峰值且降低其平均值。

6. 比较BC板、 D_3 板和F板下的功率谱密度——频率特性。

图16表示了与图15中BC板、 D_3 板和F板的 $\Delta p_{t, rms} - Y/H$ 中的 $\Delta p_{t, rms}$ 峰值的功率谱密度——频率特性。连同实验中大量的 $p_t - t$ 曲线及大量的功率谱密度——频率特性线,证明总压脉动属于各态经历的平稳随机过程。

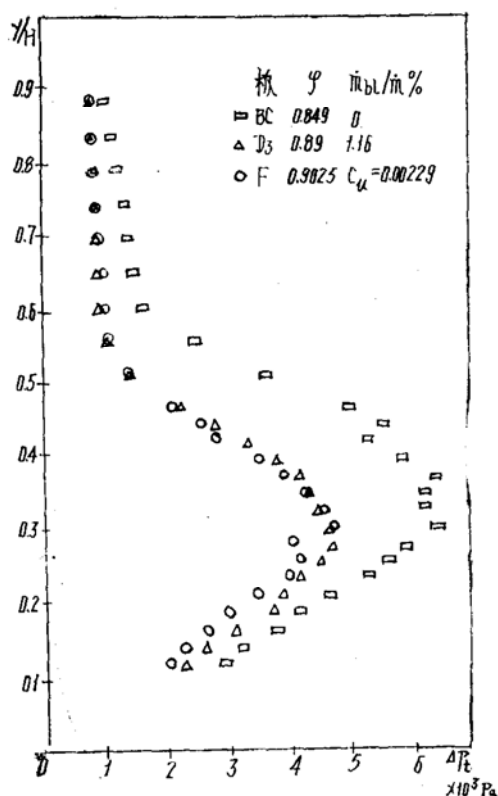


图15 比较 $\Delta p_{t, rms} - Y/H$ (SEC. IV)

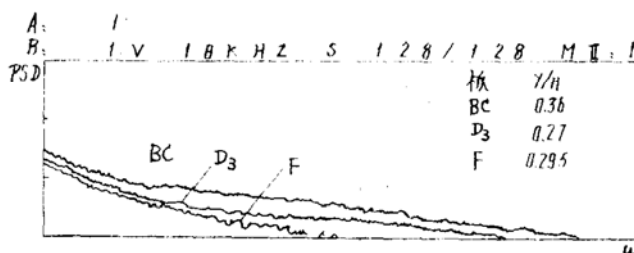


图16 PSD— ω 比较 (SEC. IV)

六、结 论

1. 本文研究的尖唇口二元超音速进气道在起飞状态下唇口壁面及压缩面前缘均形成分离区, 在斜切的进气口前缘构成一特殊的气动进气口, 使气流以相当大攻角进入进气口。并在进气口内产生类似于二元进气道在跨音速大攻角下的唇口内侧分离区, 以及沿高度的总压恢复分布规律。

2. 本文研究了几种唇口分离流吸除和吹除结构对二元尖唇口进气口内总压恢复分布、对几何喉道下游邻近截面流场及上、下壁面附面层参数, 和对进气道出口流场和畸变的影响。吸除和吹除的试验结果表明, 通过对唇口分离流的控制, 可明显地改善进气口内的流场和附面层特性, 提高进气道的总压恢复, 降低进气道出口流场畸变。

3. 本文还研究了BC板, D_3 及F板三种结构的唇口分离区再附点下游截面上的总压脉动压力均方根值分布及比较它们的功率谱密度频率特性。实验结果表明, 对唇口分离流采取如 D_3 形状吸除, F_3 形状的吹除结构, 均非常显著地降低总压脉动均方根值。其次沿高度方向在 $Y/H = 0.3 \sim 0.38$ 范围内 (BC板) 具有一个高脉动能量区; 采取吹除或吸除后, 高能量区仍然存在着, 只是大约位于 $Y/H = 0.25 \sim 0.32$ 区内。

参 考 文 献

- (1) Fradenburgh, Evan A., and Wyatt, De Marauis, D.: Theoretical performance characteristics of sharp-lip inlets at subsonic speeds, NACA TN 3004, 1953.
- (2) Joseph, F., Wasserbauer, Robert, W., Cubbison, and Charles, J., Trefny: Low speed performance of a supersonic axisymmetric mixed compression inlet with auxiliary inlets, NASA TM 83435.
- (3) He zhongwei and Zhang Shiyong: Lip separate flow blowing and analysis of coherence of inlet, ASME, 85-1GT-68.
- (4) Cawthon, J. A.: Design and preliminary of inlet concepts selected for maneuver improvement, AIAA Paper NO. 76-701.

(下接第15页)