

进气道动态畸变被动控制技术的 初 步 研 究

黄熙君 彭 旭

(北京航空航天大学)

摘 要: 对S型进气道扩压器在临界及超临界工况下的流动特性进行了研究,通过研究了解超临界工况下动态畸变的形成和变化特征。国内外的研究均表明:进气道内激波与附面层的相互干扰是引起动态畸变的主要原因之一,因而本文中采用壁面处理被动控制技术进行激波与附面层干扰的控制,用以抑制动态畸变。研究结果表明:在较大的超临界工况下,该控制技术可明显地抑制激波的失稳和振荡,从而使动态畸变的气流脉动峰值下降约60%。

主题词: 进气道, 流场畸变, 控制

PRELIMINARY INVESTIGATION OF INLET DYNAMIC DISTORTION AND IT'S PASSIVE CONTROL

Huang Xijin Peng Xu

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: In this paper, the inlet diffuser flow under critical and supercritical operation condition was studied. From the investigation of supercritical operation condition the formation and characteristic of dynamic distortion have been understood. The dynamic distortion of inlet diffuser mainly is caused by interaction of shock wave with boundary layer. A passive control method was used to reduce the interaction of shock wave with boundary layer. The results of experiments show that under very supercritical operation condition the passive control method obviously reduces the unsteadiness and oscillation of terminal shock wave in diffuser, and the peak value of pressure fluctuation decreases by about 60%.

Keywords: Inlet, Flow distortion, Control

本文1991年4月25日收到, 本课题为航空科学基金资助项目

一、前 言

随着军用机的战术技术要求日益提高,对机动性和工况变化范围的要求更为突出;而进气道的设计却要求采用短尺寸多弯曲的流路,这使进气道/发动机的相容性问题更为突出,尤其是动态畸变问题越来越成为相容性中的主要技术问题。本文对S型进气道扩压器在临界及超临界工况下的流动特性进行了研究,通过研究可了解超临界工况下动态畸变的形成和变化特征,然后应用壁面处理技术开展动态畸变的抑制问题研究。

国内外的研究均表明,进气道内激波与附面层的相互干扰是引起动态畸变的主要原因之一,因而抑制进气道动态畸变的措施之一是控制并削弱激波与附面层的相互干扰。近年来国外为减少超临界翼型的阻力,进行了激波与附面层相互干扰的被动控制技术研究,主要是对翼型表面作特殊的开槽和开孔处理。研究表明,对抑制激波/附面层干扰,减少阻力是有效的。目前已将该抑制方法应用于压气机叶栅中的流动研究。本文将该被动控制技术应用与进气道扩压器内,用以抑制动态畸变。初步研究结果表明:被动控制技术抑制动态畸变是有效的,尤其是在较大的超临界工况下,可明显地抑制激波的失稳和振荡,从而较大地减少动态畸变脉动量。

二、试验系统

本文实验是在北航热动力研究所的扩压段试验设备上进行的,该设备为吹气式风洞,进气道扩压器的试验工况是通过调节风洞上游气流总压来实现的。试验系统示意图如图1所示。

试验扩压器模型由上下壁面组成,下壁面扩张角为 15° ,从扩压器进口至下壁末端长159mm,上壁面为 9° 收缩角,收缩楔面长150mm,然后折转为平面,上下壁面形成二维S型扩压流路,其总扩张角为 9° 。扩压器进口喉部面积为 $25 \times 100 \text{ mm}^2$,出口面积为 $40 \times 100 \text{ mm}^2$,面积扩张比为16。模型示意图如图2所示。由图可见,气流以平行方向流经喉部,然后向下折转,形成上下壁面不同的流场条件,之后再转回平行方向,这即表示出气流流经S型弯曲流路的基本特征。

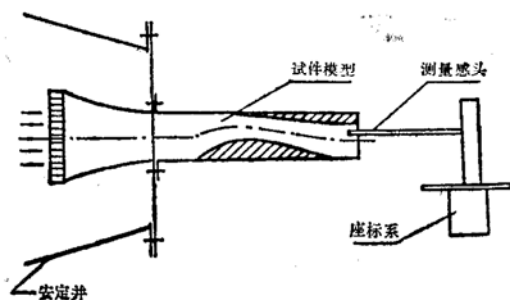


图1 试验系统示意图

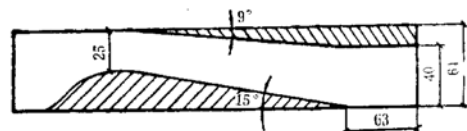


图2 试验模型方案

实验分别用稳态压力和动态压力测量系统测定扩压流动过程的稳、动态气流特性。稳态压力测试系统由测压受感部、扫描阀、PS-80微机数据采集、处理系统和打印输出各部

分组成。稳态压力测点包括扩压器沿程16个静压测点以及扩压器进出口总压测点。动态压力测试系统由XCQ-80高频压力传感器、Vishay 2100讯号调理器、TEAC-SR-70C磁带记录仪、CF500/CF501讯号分析仪、讯号分析绘图仪以及TSI1076均方根表等组成。由于进气道扩压流动中的气流压力脉动通常为各态历过程，故试验研究中仅用一个动态压力传感器，通过五自由度座标机构调节感头位置，以确定扩压器出口流场中的脉动压力分布情况。所记录的压力动态讯号应用讯号分析仪和均方根表，得出扩压器出口流场中每一点的总压平均值、脉动量均方根值、概率密度分布和自功率谱分布。

三、被动控制技术方案

扩压器超临界工况下激波与附面层相互干扰主要将引起气流总压损失和附面层分离脉动，严重的情况下将会形成结尾激波的失稳。气流总压损失在超临界条件下是由进气道/发动机流量匹配条件决定的。而附面层分离脉动和激波失稳脉动振荡是进气道动态畸变形成的主要原因。附面层分离以及激波失稳的根本机理在于激波前后的逆压梯度，为之被动控制技术的方案应考虑如何削弱激波前后的逆压梯度。国外超临界翼型研究中采用激波区壁面开槽或开孔处理，其设计思路是通过壁面槽道或开孔区，将激波后贴壁气流引向激波前，从而减弱逆压程度，抑制附面层的分离和激波与附面层相互干扰引起的激波失稳振荡。其方案示意图如图3所示。对绕流影响的光学干涉图如图4所示，由图可见，激波区内设置壁面开孔后，将原来的一道较强的激波变为一斜一正激波，减弱了逆压梯度。

按上述的设计思想，在扩压器壁面上采取开槽和开孔二种结构方案。本文所研究的扩压器上下不对称，上壁面为收缩面，下壁面为扩张面。由于扩张面上附面层的发展和分离更为

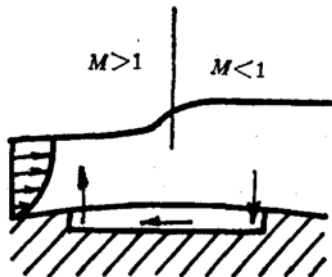


图3 被动控制方案

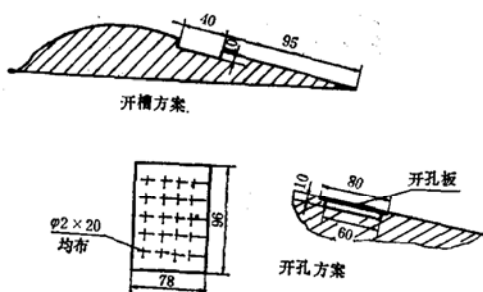


图4 绕流光学干涉图

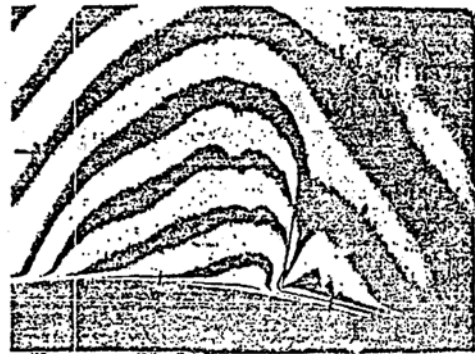


图5 开孔结构及开槽结构示意图

严重, 因之仅在下壁面上设置被动控制结构措施。开槽或开孔区的确定主要依据超临界结尾激波位置来考虑。理论上一维流估算激波前马赫数13~15相应的扩压段位置确定为开槽、开孔区, 开槽及开孔结构示意图如图5所示, 开孔面积为控制区面积的2%。

四、试验结果及其分析

1. 原方案试验模型的稳态流动特性

原方案试验模型在不同工况下进行了吹风试验, 工况变化范围以上游进口总压表示, 进口总压从30至70kPa表压每间隔10kPa变化, 共有五个工况。图6为各工况下的沿程马赫数变化。由图可见, 在进口总压为29418Pa条件下, 扩压器喉部已达音速临界工况, 当进口总压大于30kPa表压时, 在扩压段内均出现超音速区, 存在有结尾激波, 马赫数在激波前后有突变, 因为沿程马赫数是通过测定壁面静压确定的, 故马赫数的突变过程不明显。沿程马赫数变化过程表示出在上游总压为60~70kPa表压条件下, 结尾激波前马赫数已达1.4~1.55, 表明其超临界程度是较大的。各工况条件下的扩压器出口总压分布表示在图7中, 由图可见, 在临界和低超临界工况下, 也即进口总压小于50kPa表压条件下, 扩压器出口核心流场基本上是分布均匀的。上下壁面附面层不对称, 上

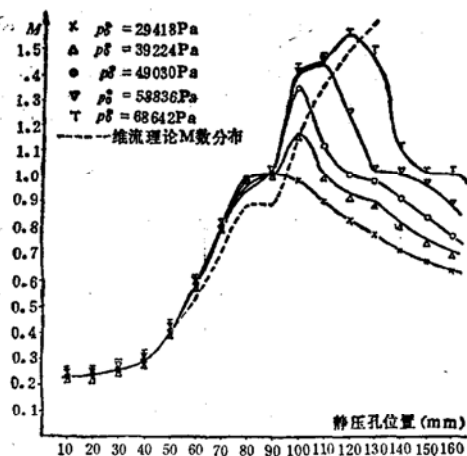


图6 原方案在各工况下的沿程 M 数分布

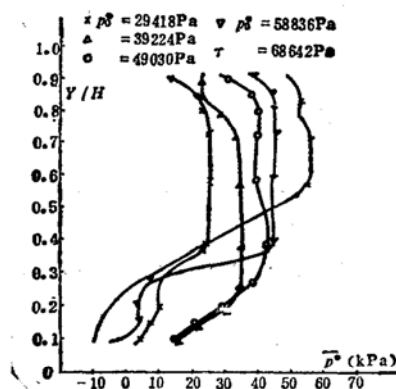


图7 不同工况条件下的扩压器出口总压分布

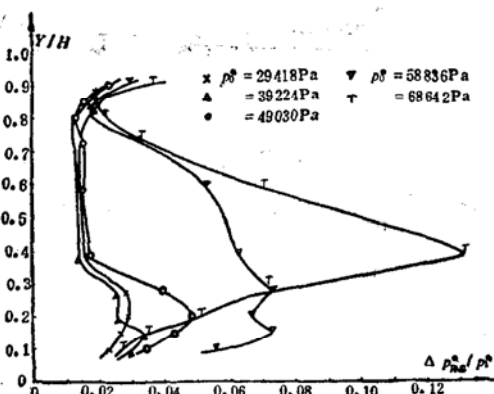


图8 不同工况下扩压器出口流场总压脉动分量的均方根值分布

壁面附面层较薄, 而下壁面层则较厚, 二者相差约一倍。当扩压器超临界程度较大时, 也就是当进口总压为60~70kPa表压情况下, 扩压器出口流场分布的畸变程度明显增大, 尤其是下壁处的流场分布, 呈现壁面附面层分离现象。

2. 原方案试验模型的动态流动特性

图8中表示的是各工况下扩压器出口流场总压脉动分量的均方根值分布, 由图可见, 当进口总压小于50kPa表压条件下, 也即在弱超临界条件下, 扩压器出口核心流场的压力脉动量是较低的, 而在壁面附面层内则呈现脉动峰值, 其脉动量明显高于核心核, 近壁面处受壁

面条件的抑制作用其脉动量减小,这测定结果与国外相类似的试验结果是相一致的。从上下壁面看,由于上壁面为收缩面,附面层较薄,而激波的相互干扰作用较弱,因而相应的压力脉动量也较小,脉动区范围较小壁面为小。这体现了S型弯曲流路中动态压力畸变分布的基本特征。

当超临界程度增大时,如进口总压为80kPa表压以上,由图8可见,扩压器出口流场核心部分的压力脉动明显增大,而且将大于附面层内的压力脉动量,这即表明:附面层与结尾激波之间的相互干扰增强,形成附面层分离及激波失稳振荡。由于S型弯曲流路的特征,在下壁面处附面层易于分离,因而结尾激波的失稳激振源应位于下壁面。图中压力脉动量的分布也显示出扩压器下部流动的脉动量较上部为大,而上壁附面层内的脉动量基本上保持与低超临界条件下相同。由上述情况可知,为抑制超临界条件下的激波失稳振荡所形成的较强压力脉动,应在下壁面进行适当的壁面处理以延迟或减弱激振源的形成。

3. 原方案模型脉动压力的频谱分析

为较详细地了解流场脉动压力的频谱特征,对所测的各工况下的动态压力变化过程均进行了APD和PSD分析,从APD分析结果可见,脉动压力分布基本上为正态分布类型。

图9及图10中表示的是临界工况下附面层中压力脉动讯号记录样本及其PSD分布和核心区中压力脉动讯号记录样本及其PSD分布。由图9可见,附面层中脉动压力的自功率谱分布属随机白噪声特征,无明显的特征频率。图10中表示出核心区中气流压力是相当平稳的,只是略有脉动,脉动压力的PSD分析表明:在550Hz处有一峰值,可能为扩压器管路谐振频率,但从总体上看仍然为随机脉动过程。

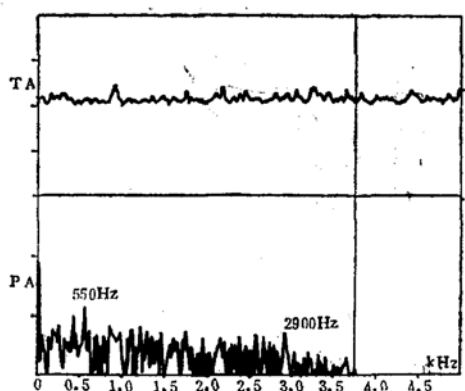


图9 临界工况下压力脉动过程及其PSD分布 (测点位置 $Y/H = 0.1$)

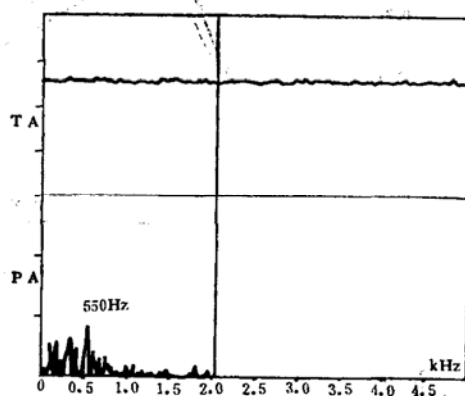


图10 临界工况下核心区压力脉动过程及其PSD分布 ($Y/H = 0.5875$)

图11和图12表示的是大超临界工况下,下壁附面层和核心区位置处的压力脉动记录样本及其PSD分布。由图可见,不论是下壁附面层还是激波失稳的核心区处,其PSD分布均属随机白噪声类型特征。

4. 被动控制技术抑制动态畸变的效果

为抑制动态畸变,在研究中采用开孔(方案Ⅰ)及开槽壁面处理(方案Ⅱ),对扩压跨音流动中的激波/附面层相互干扰进行被动控制。对比原方案试验结果与应用被动控制技术后的试验结果,即可得出被动控制技术抑制动态畸变的效果。

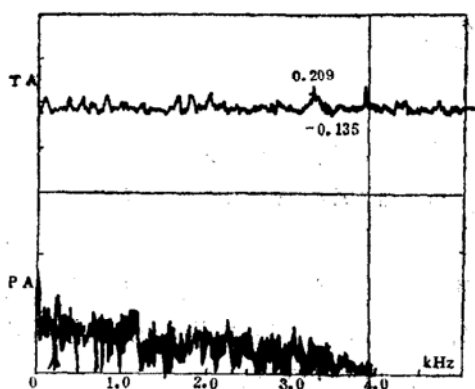


图11 大超临界工况下附面层内压力脉动过程及其PSD分布 ($Y/H = 0.1$)

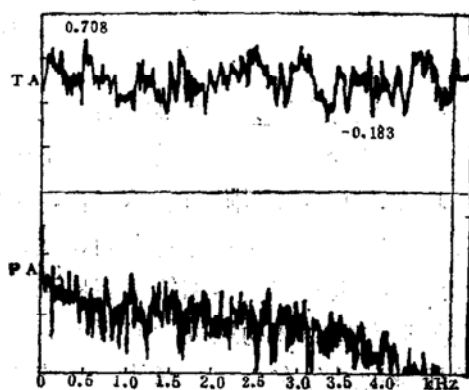


图12 大超临界工况下核心区压力脉动过程及其PSD分布 ($Y/H = 0.3875$)

图13表示扩压器超临界程度较低的工况条件下的动态畸变量对比情况,该工况下进口总压为50kPa表压。由图可见,应用被动控制技术后,不论是方案I或方案II,在下壁附面层下部其脉动量受到抑制而减小,但在下壁附面层上部其脉动量却增大,也就是改变了总压脉动量的分布。将上壁附面层中的脉动量峰值位置上移,而峰值量基本上保持不变。上壁附面层范围内总压脉动量略有减小,这主要是由于下壁附面层的扩大而使上壁附面层减薄而形成的。

图14中表示的是超临界程度较高的工况下的动态畸变量对比情况,该工况下进口总压为70kPa表压。由图可见,方案I的抑制效果相当显著,基本上维持在低超临界工况条件下的脉动量,方案II采用开孔腔室对超临界程度较高的工况条件下的动态畸变动量抑制作用不明显,从脉动量上看有一定量的减小,但其分布与脉动量级基本上与原方案相近。这也表明,开孔腔室方案有一定的抑制作用,但由于开孔率较小,其作用不显著。从方案I开槽壁面处理在较高的超临界工况下的被动控制效果可知,它主要是抑制了结尾激波与附面层相互干扰后的激波振荡,从而使出口流场总压脉动量能维持在低超临界工况下的水平和分布特征。

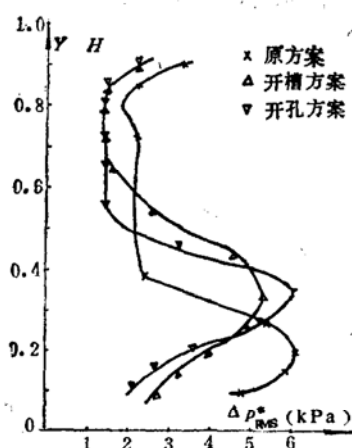


图13 小临界工况下被动控制技术方案与原方案的 Δp_{RMS} 比较

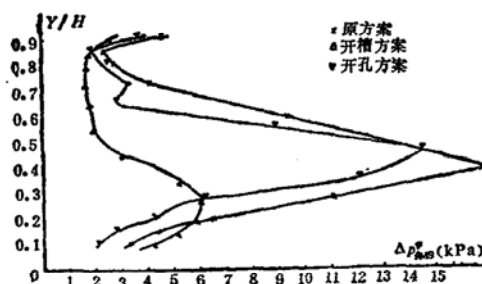


图14 大超临界工况下被动控制方案与原方案的 Δp_{RMS} 比较

五、结 论

通过上述试验研究可得出如下几点结论:

1. 在扩压器临界和低超临界工况下,出口核心流场分布基本上是均匀的。由于S型流路的特征,上下壁面附面层不对称,下壁附面层较厚。在超临界程度较大时,下壁附面层呈现分离,出口流场的稳态畸变明显增大。

2. 扩压器在临界和低超临界工况下,出口核心流场的压力脉动量是较小的。该情况下主要的动态畸变脉动量位于壁面附面层内,由于壁面对气流脉动有抑制作用,故在附面层内的总压脉动量分布存在有峰值,峰值位置与附面层厚度和速度分布有关。

3. 当扩压器在较强的超临界工况下,由于结尾激波与附面层的相互干扰,形成激波失稳振荡,使扩压器出口核心流场的总压脉动量显著增大,成为出口流场中的脉动量峰值。S型扩压流路中下壁附面层易于分离,因而是激波失稳的激振源。

4. 采用壁面处理被动控制技术后,在扩压器临界和低超临界工况下,改变了原方案的出口流场总压脉动量分布情况,将下壁附面层中的脉动量峰值位置上移,而峰值量基本上保持不变。总的看来,在这工况下所应用被动控制技术的抑制作用不明显。

5. 在扩压器超临界程度较强时,开槽方案的抑制作用显著,主要消除了激波的失稳振荡。开孔方案略有效果,但脉动量分布和量级基本相同,表明其开孔率不够,未能起到削弱逆压梯度,抑制激波振荡的作用。

参 考 文 献

- (1) Bohning R. Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Shock Boundary Layer Interaction with Passive Flow Control. 1st International Sym. on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal flow. 1990, Beijing, China
- (2) Stumpf R, Neumann H E, Giamati C C. Dynamic Distortion in a Short S-Shaped Subsonic Diffuser with Flow Separation. AIAA 83-1412
- (3) Huang Xijun, Li Huaiti, Dong Jinzhong. Experimental Investigation of Dynamic Distortion Properties in Transonic Flow Diffuser. ASME 85-IGT-15