

吊挂安装效应对热喷流噪声影响实验

何敬玉^{1,2}, 李晓东¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团有限公司 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

摘 要: 利用位于全消声室中的热喷流噪声实验台对涵道比为 5.5 的分开式排气系统进行了吹风实验, 研究了在起飞工况下吊挂的安装效应对喷流噪声和锯齿型喷管降噪效果的影响。结果表明:吊挂的安装效应改变了喷流噪声周向的频谱特性;安装效应降低了喷流噪声低频段的噪声并导致高频噪声增加;安装效应对吊挂上方位置低频段噪声降噪量最大,其最高频谱降噪量为 3.7 dB;带吊挂锯齿型喷管对吊挂上方喷流噪声影响较小,但是会降低吊挂下方和侧面的低频段噪声,其中对吊挂下方低频段噪声降噪量最大,频谱降噪量最大约 1.3 dB;锯齿型喷管对侧面位置的高频噪声影响最大;吊挂的安装效应对喷流噪声远声场总声压级指向性影响不大。

关 键 词: 热喷流噪声; 分开式排气; 安装效应; 吊挂; 锯齿型喷管

中图分类号: V231.3; TB52⁺5

文献标志码: A

Experimental of the pylon installation effect on hot jet noise

HE Jingyu^{1,2}, LI Xiaodong¹

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. China Academy of Aerospace Aerodynamics,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100074, China)

Abstract: This experiment was made to study the installation effect on the radiated noise from separate flow nozzles with a bypass ratio of 5.5 at take-off condition, as well as the jet noise reduction of pylon-based chevron nozzles. All the experiments were conducted on the hot jet noise rig located in the anechoic chamber. The results indicated that the pylon made an azimuthal dependence on the far field radiated jet noise frequency spectrum. The pylon was effective at low-frequency with reducing noise but produced an increase of noise at high-frequency. The most significant low-frequency noise reduction was observed in position located above the pylon where the peak noise reduction was 3.7 dB on frequency spectrum. There was little effect of chevron nozzles on the jet noise radiated from the top of the pylon. The low-frequency noise reduction on the pylon was observed below and laterally while the position below the pylon had the best low-frequency noise reduction whose peak noise reduction was about 1.3 dB on frequency spectrum. The largest impact of pylon on high-frequency noise was only on the side. The installation had little effect on the far field overall sound pressure level directivities.

收稿日期: 2016-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51476005)

作者简介: 何敬玉(1985—),男,博士,主要从事航空发动机排气系统噪声研究。E-mail:hejingyu11@126.com

引用格式: 何敬玉, 李晓东. 吊挂安装效应对热喷流噪声影响实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5): 1057-1064. HE Jingyu, LI Xiaodong. Experimental of the pylon installation effect on hot jet noise[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(5): 1057-1064.

Key words: hot jet noise; separate flow; installation effect; pylon; chevron nozzles

随着飞机的数量与起降密度不断增大,机场附近地区的飞机噪声成为一个日益严重的环境污染问题。随着大涵道比涡扇发动机的广泛应用与喷流噪声控制技术的进步,喷流噪声已经得到了很好的控制。但是随着越来越严厉的飞机噪声试航条例,在飞机起飞阶段,在低频段占据主导地位的发动机喷流噪声,依然是最主要的噪声源之一,甚至成为某些较高噪声飞机的飞行障碍。

一般认为^[1-2]亚声速喷流噪声主要是湍流混合噪声,并具有明显的指向性。强化内外涵气流的掺混或发动机气流与外界环境气体的混合是降低湍流混合噪声的主要手段之一,在这方面众多研究者做了大量的工作。Bradbury 等人^[3]最早提出了在喷管出口添加 Tab 齿形的思想。Samimy 等人^[4]认为 Tab 齿形产生的对旋涡增加了喷管流场剪切层内的掺混作用。波瓣混合器^[5-6]通过把内涵核心区的高温、高速流体与外涵的低温、低速流体相互引入来增加流体的掺混。Papamoschou^[7]认为在喷管添加导向肋片可以降低内外涵的对流马赫数从而增加内外涵的掺混作用。Zaman^[8]认为喷管微射流技术可以使得喷流内引入更多的流向涡,大大的增加了喷流的掺混作用。锯齿型喷管是目前认为减少大涵道比发动机喷流噪声的最好方法之一^[9-10]。这些喷管的特点是在喷管边缘形成的锯齿结构产生流向涡并引导涡流进入剪切层,从而增加了掺混并降低了喷流核心区的长度。何敬玉等人^[11]利用实验的方法研究了锯齿型喷管的冷喷流噪声降噪特性,结果表明锯齿型喷管对喷流噪声下游方向具有最好的降噪效果;何敬玉、李晓东^[12]对带有吊挂的热喷流噪声进行了实验研究,结果表明锯齿型喷管在吊挂下方轴向远声场的下游方向降噪量最大。汪洋海、李晓东^[13]对锯齿型喷管在超声速喷流中的降噪特性进行了实验研究,研究表明,锯齿型喷管增加了掺混作用,对啸声的强度有明显的抑制作用。庄家煜、李晓东^[14]对各种形状的喷管出口进行了实验研究,结果表明锯齿型喷管不但能有效地降低发动机噪声,并且对发动机的推力损失最低。Saiyed 等人^[15]对分开式排气系统进行了大量的测试,结果表明优化后的锯齿型喷管在飞机起飞时可以降低噪声大约 2.7 dB(EPN),并且在巡航状态下的推力损失只有 0.06%。

但是之前许多关于喷流噪声的产生机理与降

噪技术方面的研究并没有考虑吊挂的安装效应对喷流噪声的影响。Thomas 等人^[16]的研究表明,在发动机结构中,吊挂的存在会影响发动机出口的气流,改变了排气系统流场的对称性,从而对喷流噪声产生较大的影响。另外,涵道比的增加显著的降低了喷流噪声,但是随着涵道比的增加会使得短舱与机翼的相对位置变小,从而使得吊挂的安装效应对喷流噪声的影响变得显著。

一般来讲^[17],在锯齿的设计时,吊挂的安装效应是必须要考虑的,吊挂对喷管的内外涵都有重要的影响。吊挂的安装改变了整个系统的气动性能并对喷流噪声有一定的抑制作用。由于现在发动机排气系统噪声的进一步降低已经变的十分困难,所以吊挂的影响对飞机排气系统的气动噪声来说变得相当重要。

本文主要通过实验的方法研究了吊挂的安装效应对喷流噪声远声场的影响,并进一步分析了在带有吊挂的锯齿型喷管在分开式排气系统中远声场的声学特性。实验中共研究了 3 种不同结构的分开式排气喷管,包括一种基本型无吊挂喷管和两种带有吊挂的喷管,后两种包括基本型喷管和内涵带有锯齿结构的喷管。在全消声室中对这 3 种喷管进行了热喷流噪声实验,获得了不同喷管的远声场测量数具,分析了吊挂与锯齿结构对远声场降噪效果的影响。

1 实验方案

1.1 实验台

本文带有吊挂装置的分开式排气系统热喷流噪声实验是在北京航空航天大学流体与声学实验室的全消声室中进行的,全消声室净空间尺寸为 $8.9\text{ m} \times 6.8\text{ m} \times 4.65\text{ m}$,低频段截止频率为 250 Hz。本实验设备为同轴喷流实验台,可以精确的模拟分开式排气系统在不同的喷管出口压比和出口温度比下的热喷流噪声实验。根据目前一系列的实验测试结果,本喷流实验台可以进行内外涵面积分别为 640 mm^2 和 2000 mm^2 的分开式排气系统缩比模型的高亚声速热喷流实验,实验时内涵喷管出口的总温可达 980 K。

本实验中所用到的暂冲喷流实验台立体结构如图 1 所示。实验台主要包括实验段、燃烧室、气流控制段以及气源四部分。实验段位于消声室内,用于安装各种实验件以及测量装置。燃烧室

位于消声室内,用于内涵喷管气体的加热,通过燃油调节系统进行喷管出口温度的控制。气流控制段位于控制室内,通过气动压力阀的比例-积分-微分(PID)智能压力变送器和压力调节器控制实验内外涵喷管出口的总压,其调节精度控制在 1.5% 以内。气源位于实验室外,在本实验中,实验室气源可以提供持续时间不小于 15 min、压力不低于 0.4 MPa 的干燥压缩空气,可以有效的保证实验中喷管出口温度和压力的调节时间。

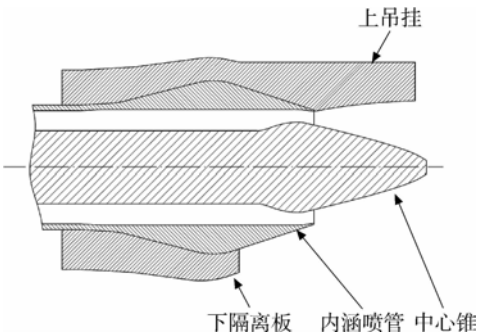


图 2 内涵喷管与吊挂安装结构图
Fig. 2 Configuration of core nozzle with pylon

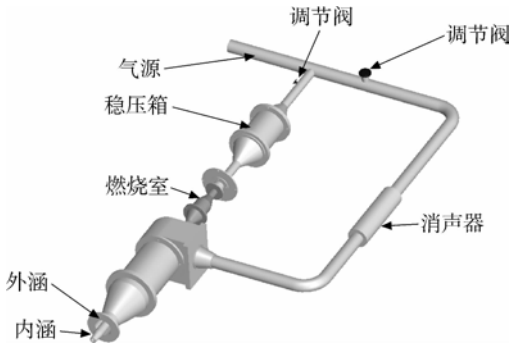


图 1 热喷流噪声实验台
Fig. 1 Hot jet noise rig

1.2 实验工况

实验中,通过同轴暂冲式热喷流实验台,对带有吊挂的分开式排气系统进行了吹风实验。所用喷管的内外涵出口面积分别为 502 mm² 和 1505 mm²;实验时喷管的涵道比为 5.5;内涵喷管出口压比(NPR)为 1.51,外涵喷管出口压比为 1.61;其中内涵喷管的出口气体为高温燃气,总温为 873 K,外涵气体温度为常温。

本实验共设计了 3 种不同结构的喷管。第一种为基本型无吊挂喷管,第二种为基本型带吊挂喷管,第 3 种为内涵带有吊挂的锯齿型喷管,锯齿齿数为 8 切入角为 18°。图 2 和图 3 分别给出了内涵喷管与吊挂安装示意图和 3 种喷管的实物图。

1.3 测量方案

为了研究吊挂对喷流噪声远声场的影响,本实验对 3 种不同的喷管进行了远声场的声学测量。由于吊挂的安装效应改变了喷流噪声的周向对称性。因此该实验对喷管周向的远声场进行了测量。本文对所有不同的喷管进行了远声场声学测量,在声学测量中所采用传声器为 6.35 mm(1/4 英寸)的 B&K-AS04,采集卡为 64 通道的 NI-PXI4496 动态信号数据采集卡。在信号采集中的

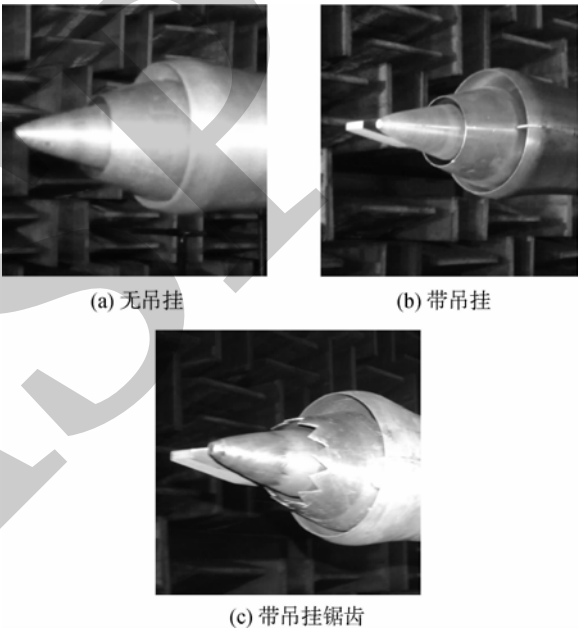


图 3 不同喷管实物图
Fig. 3 Configuration of different nozzles

声学数据都是以二进制的时域信号接收和存储的,后处理系统是采用定制开发的 LabVIEW 程序。

通过在远声场布置多支传声器来研究带有吊挂的分开式排气喷管的远声场声学特性。对锯齿喷管进行远声场测量来获得在考虑安装效应下的锯齿喷管的喷流噪声指向性以及各成分的幅值和频率特性。根据喷流噪声各成分的传播特点以及实验室现有测量条件,周向远声场测量方案如图 4 所示。麦克风位于内涵出口的平面上,测点位于以内涵出口中心为圆心,测量半径为 32 倍内涵出口直径的圆弧上。将位于吊挂的正上方位置定义为 0°测量点,正下方定义为 180°测量点,每隔 30°布置一个传声器,组成 7 只麦克风阵列。

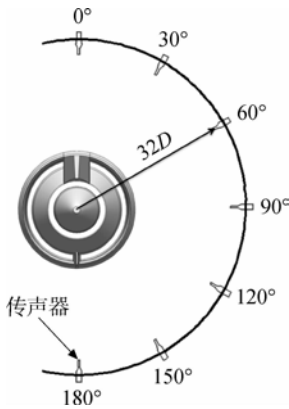


图 4 远声场测量方案

Fig. 4 Far field measurement schematic diagram

2 实验结果分析

2.1 无吊挂喷管周向不同测点频谱的对比

为了保证喷管远声场周向测量的对称性,本章首先研究了轴对称喷管即基本型无吊挂喷管的周向频谱结果,分析了不同测点的反射以及麦克风的不同对声场频谱的影响。图 5 给出了基本型无吊挂喷管在周向不同方向的频谱对比结果。图中横坐标为对频率进行无量纲化处理后的斯特劳哈尔数,本文中所有图中的频率坐标均按照如下公式进行了无量纲化处理。

$$St = f \cdot d / u \tag{1}$$

式中 St 为斯特劳哈尔数, f 为频率, d 为喷管的出口直径, u 为喷管的出口速度。

通过图 5 可以看出 3 个不同周向测点位置的频谱曲线吻合较好,尤其是在频谱的高频段($St > 0.5$)。在周向 90° 测点的低频段($St < 0.5$)声压级较高,这主要是因为 90° 测点位置距离消声室地面较近,与其他测点相比受到的反射影响较大,因此会有较高的声压级,但是与其他频谱的整体吻

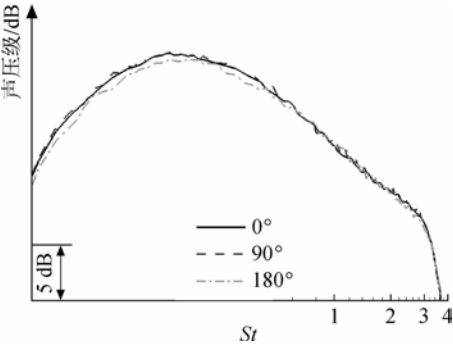


图 5 基本型无吊挂喷管在不同测点频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum of standard nozzles without pylon at different position

合性较好。

本文中所有的喷管实验数据都是在相同的工作和测量条件下获得的,另外本中每个测点之间的对比数据都是在相同麦克风下进行的,保证了实验对比的可靠性。

2.2 吊挂对喷流噪声远声场频谱的影响

由于吊挂的安装效应改变了喷管出口流场的对称性,因此带有吊挂喷管的远声场频谱也相应的发生了变化。图 6 表示了基本型带吊挂喷管在不同位置的远声场频谱图。图中给出了分别代表吊挂上、中、下 3 个位置的结果,分别为 0° 、 90° 和 180° 。通过图 6 可以看出吊挂的存在改变了喷管不同周向位置的远声场频谱。在吊挂的下方即 180° 方向,高频段噪声是最低的,但是低频段噪声略低于 90° 方向;吊挂上方的低频段噪声值最低,频谱上低于吊挂的下方和侧面位置最高约 1.8 dB,但是高频段噪声值与 90° 方向相差不明显;对于吊挂的侧面即 90° 位置,其低频段噪声是最高的,高频噪声与 0° 方向相似,但是高于 180° 方向。

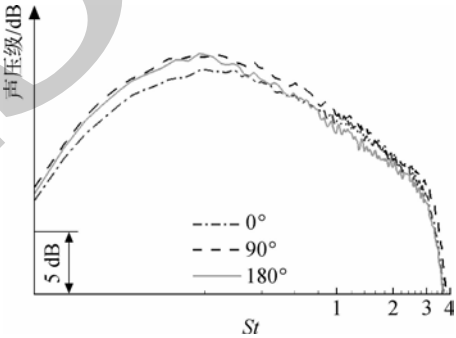


图 6 基本型带吊挂喷管在不同测点频谱图

Fig. 6 Frequency spectrum of standard nozzles with pylon at different position

以往研究^[17-18]表明,喷管出口位置的边界层比较薄,极易受到出口结构的影响进而对喷流噪声产生影响。由于吊挂的影响,导致在吊挂位置处的流体边界层增厚,并增大了吊挂部位低速区的厚度,导致下方的流体有向上偏转的趋势,改变了流体周向分布的均匀性,从而导致了喷流噪声周向指向性的非对称性。

为了更清晰的分析安装结构对每个角度频谱的影响,图 7~图 9 给出了有无吊挂两种喷管在不同位置的频谱对比结果。通过图可以看出吊挂对低频段的影响最大,降低了低频段的噪声值。因为吊挂的安装破坏了喷管出口的大尺度相干结构,抑制了大尺度涡系结构的生成。Tam 等人^[19]

认为,大尺度涡系结构是低频噪声产生的主要原因,因此会导致低频段噪声的降低;另外,吊挂会导致高频段噪声的增加。这主要是因为吊挂的存在使得流场中引入了更多的流向涡,增加了小尺度涡系结构的数量,而小尺度涡系结构是高频噪声产生的主要原因,因此会导致高频段噪声的增加。

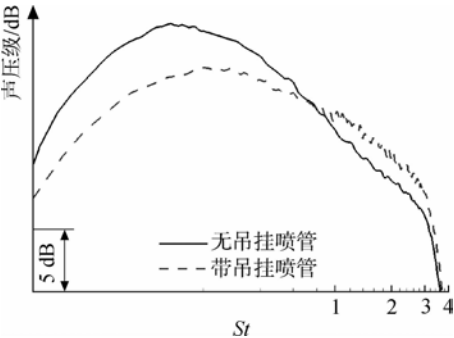


图 7 有无吊挂喷管在 0°测点的频谱对比

Fig. 7 Frequency spectrum of standard nozzles with and without pylon at 0°position

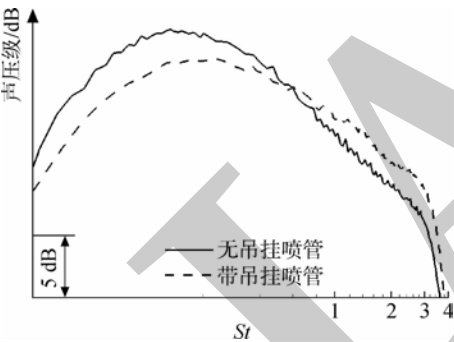


图 8 有无吊挂喷管在 90°测点的频谱对比

Fig. 8 Frequency spectrum of standard nozzles with and without pylon at 90°position

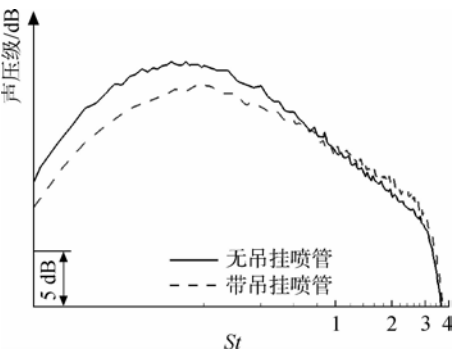


图 9 有无吊挂喷管在 180°测点的频谱对比

Fig. 9 Frequency spectrum of standard nozzles with and without pylon at 180°position

通过 3 个位置的比较可以看出,180°位置的低频噪声降噪量最小,高频段噪声的增加也最小,频谱最高增加量仅为 1.2 dB;在 0°位置,喷流噪声的低频段降噪量最大,最高为 3.7 dB,高频段的频谱增加量最高为 2.0 dB。对于 90°位置,低频段的降噪量位于前两者之间,但高频段噪声频谱的增加量最大,约为 2.5 dB。Michael 等人^[20]的研究发现,吊挂的安装增加了喷管出口上剪切层位置的湍动能,降低下剪切层的湍动能。Thomas 等人^[21]认为喷管出口湍动能的增加会增强该处声源的强度,并且导致剪切层内小尺度涡系结构数量与涡强度的增加。而小尺度的湍流结构是高频噪声产生的主要原因,因此会导致下剪切层位置,即吊挂下方高频噪声的增加最小。在吊挂的上方,湍动能的增加导致了吊挂附近的掺混作用强,抑制了大尺度涡系结构的生成,所以低频段噪声的降噪量最大。而在 90°位置,Massey 等人^[22]认为该位置吊挂与内涵流体的相互作用最大,导致内涵出口位置的边界层厚度增大,从而增大对侧面湍动能的影响,所以吊挂侧方位的高频噪声略高于吊挂下方的高频噪声。

2.3 锯齿型喷管的周向降噪效果分析

锯齿型喷管的降噪机理^[23]是利用出口处的锯齿结构将剪切层内引入流向涡以增加喷流的掺混作用,从而改变了喷流向外辐射噪声的远声场频谱特性,导致低频段噪声的降低与高频噪声的升高。吊挂和锯齿都可以改变喷管的流场特性,但是吊挂与锯齿的相互作用会对锯齿型喷管的降噪特性产生影响。

图 10 给出了锯齿型喷管在不同方向的频谱对比结果。如图所示,在低频段,锯齿型喷管在 3 个不同位置的频谱相近,但是高频段的噪声值却在吊挂的侧面位置即 90°方向最高,其他两个方向的声压级相近;从整个频谱来看,在吊挂侧面位置的声压级最高;在吊挂上方即 180°方向,低频段的噪声值居于其他两者之间,但是高频噪声值却最低;在吊挂的上方即 0°方向,低频段噪声值最低,高频噪声与吊挂下方的频谱相近。

Thomas 等人^[16]的数值研究结果表明,锯齿型喷管在锯齿附近产生的对漩涡对吊挂附近的流体有向两侧拉伸的作用,从而增大了吊挂两侧流体的掺混作用,导致吊挂两侧湍动能与小尺度涡系结构数量的增加,并增大了湍流结构的涡强度,因此会导致侧面位置高频噪声最高。

为了进一步分析锯齿结构与吊挂的相互作用对远声场频谱的影响,图 11~图 13 给出了锯齿型喷管与基本型喷管的远声场频谱对比图。由图可以看出锯齿与吊挂两者之间的相互作用对不同位置的声场频谱影响不同。如图 11 所示锯齿型喷管对吊挂上方的频谱影响不大,其影响主要体现在吊挂的下方和侧面位置,并且对低频段噪声值影响比较大。添加有锯齿结构的喷管会导致吊挂下方和侧面位置低频段噪声的降低;另外锯齿型喷管增加了侧面位置的高频噪声值,但对其余两个方向几乎没有影响。如图 12 所示,锯齿结构的安装会导致吊挂侧面位置低频段噪声的降低并增加高频段噪声值,其高频噪声频谱最高增加量约为 1.0 dB。而在吊挂的下方位置,会导致低频段噪声的降低,最高频谱降噪量为 1.5 dB。

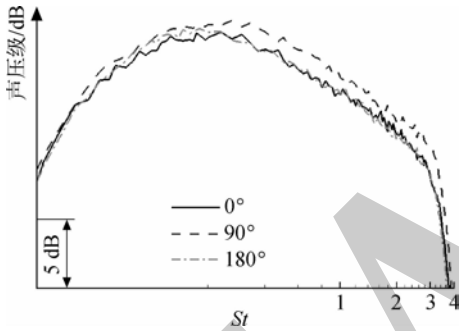


图 10 带吊挂锯齿型喷管在不同测点的频谱对比
Fig. 10 Frequency spectrum of chevron nozzles with pylon at different position

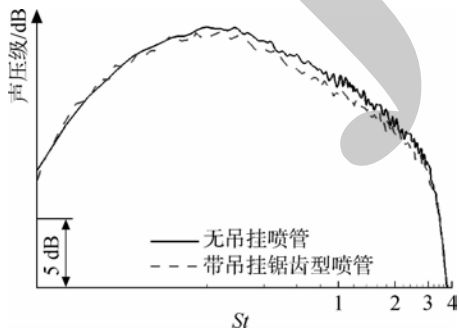


图 11 带吊挂锯齿型喷管与基本型喷管在 0°测点的频谱对比
Fig. 11 Frequency spectrum of chevron and standard nozzles with pylon at 0° position

锯齿型喷管在不同位置的降噪效果不同,主要是由于吊挂的存在改变了喷管出口流体的对称性^[16,22];另外在吊挂的位置是没有锯齿的,因此锯齿不会对吊挂上方的位置产生大的影响;内涵

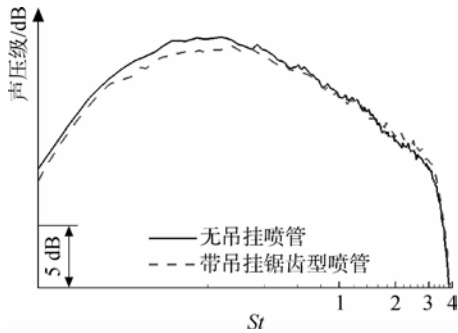


图 12 带吊挂锯齿型喷管与基本型喷管在 90°测点的频谱对比
Fig. 12 Frequency spectrum of chevron and standard nozzles with pylon at 90° position

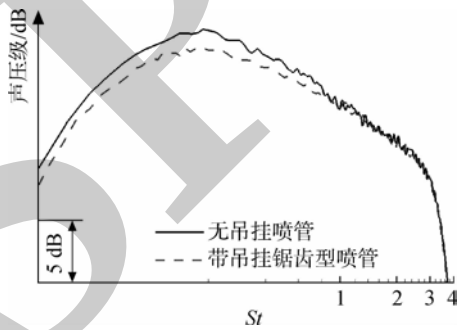


图 13 带吊挂锯齿型喷管与基本型喷管在 180°测点的频谱对比
Fig. 13 Frequency spectrum of chevron and standard nozzles with pylon at 180° position

的锯齿结构对吊挂与内涵的连接处的影响比较大,会导致吊挂附近的流体提前分离并向两侧斜向上拉伸。这种对流体的拉伸作用增加了附近流体的湍动能,抑制了大尺度涡系结构的生成,产生的更多的小尺度涡系结构由于流体的拉伸作用而向两侧偏移,弱化了对吊挂上方噪声的影响;在吊挂的下方即 180°位置,锯齿结构对流体也有向两侧拉伸的作用,该作用增加了隔离板附近流体的掺混作用,因此会导致该位置低频段噪声值的降低。由于流体的向上偏转与锯齿对流体的向两侧拉伸作用,弱化了小尺度湍流结构对下方的影响,却增加了对侧向位置的影响,所以下方位置高频段噪声没有明显的变化,但是对侧向位置的高频噪声产生了影响。

2.4 远声场指向性分析

通过上面的分析可以看出,吊挂的安装效应降低了喷流噪声低频段的噪声值,同时导致高频噪声的增加。虽然在周向不同位置,吊挂对低频

段的降噪效果不一样,但是高频噪声的增加量也是
是对整体降噪效果影响的一个重要因素。所以有
必要从总声压级的指向性上来分析吊挂对喷流噪
声的影响。

图 14 给出了 3 种喷管的远声场指向性。如
图中实线和虚线的比较所示,吊挂对喷流噪声远
声场指向性的影响不大。这主要是因为吊挂在降
低喷流噪声低频段噪声的同时会导致高频噪声的
升高,虽然吊挂降低了低频噪声,但是高频噪声的
增加掩盖了低频噪声的降低对总声压级的影响,
因此对总声压级的影响不大。

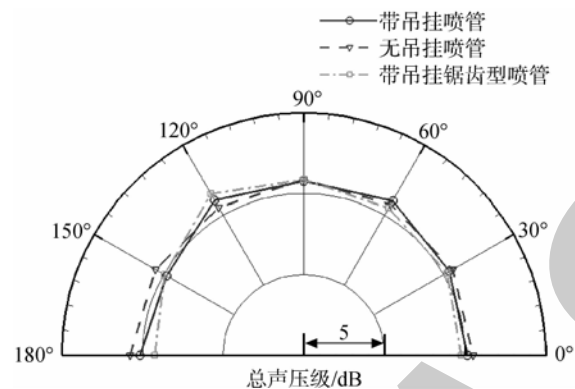


图 14 不同喷管的远声场总声压级指向性
Fig. 14 Far-field overall sound pressure level directivities
of different nozzles

通过图 14 可以看出,在吊挂的正下方位置,
吊挂的安装效应导致总声压级降低了大约 0.6
dB。这主要是因为上吊挂的存在增加了喷管上
方低速区的厚度,导致流场向上偏移,Birch 等
人^[24]认为这种流体的偏移有助于吊挂下方位置
声源强度的降低。图中实线和双点画线的对比可
以看出,锯齿型喷管对吊挂下方的影响比较大,使
吊挂下方位置的总声压级降低了大约 1.0 dB。但
是对侧方位置的影响不大,这主要是因为锯齿结
构的掺混作用只是改变了声场的频谱特性,如图
12 所示,锯齿型喷管虽然降低了低频段的噪声,
却增加了高频段的噪声值,因此对总声压级的影
响不大。

3 结 论

本实验主要利用具有全消声室环境的喷流噪
声实验台对涵道比为 5.5 的分开式排气系统进行
了热喷流吹风实验,研究了安装效应对喷流噪声
周向远声场的影响,并在此基础上进一步研究安
装效应对锯齿型喷管降噪特性的影响,所得结论

如下:

1) 安装效应改变了喷流噪声周向的频谱特
性,但是对指向性的影响不是很大。吊挂的安装
降低了喷流噪声低频段的噪声,最高频谱降噪量
为 3.7 dB;但是会引起高频段噪声的增加,增加量
随着位置的不同而改变。

2) 带有吊挂喷管的喷流噪声频谱在周向呈
现不对称性。吊挂侧面位置的频谱声压级最高;
吊挂上方的低频段噪声最低,高频噪声与侧面位
置相近;吊挂下方的高频噪声最低,低频段噪声值
介于前两者之间。

3) 带有安装结构的锯齿型喷管可以降低吊
挂下方的总声压级,但是对其他位置的影响不大;
对低频段噪声的影响与位置有关。对吊挂上方位
置的影响不大;降低了吊挂下方的低频噪声,最
高频谱降噪量为 1.3 dB,但是对高频噪声的影响
不大;在降低侧面低频段噪声值的同时会导致高
频噪声的增加,其频谱最大增加量为 1.0 dB。

参考文献:

[1] TAM C K W. Jet noise; since 1952_1[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1998, 10(2): 393-405.
[2] TAM C K W. The sources of jet noise; experimental evidence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 61(5): 253-292.
[3] BRADBURY L J S, KHADEM A H. The distortion of a jet by tabs[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 70(4): 801-813.
[4] SAMIMY M, ZAMAN K B M Q, REEDER M F. Effect of tabs on the flow and noise field of an axisymmetric jet[J]. AIAA Journal, 1993, 31(3): 609-619.
[5] SALIKUDDIN M, MARTENS S, JANARDAN B A, et al. Experimental study for multi-lobed mixer high bypass exhaust systems for subsonic jet noise reduction: Part II acoustic results[R]. AIAA 99-1988, 1999.
[6] GLIEBE P R, BRAUSCH J F, MAJJIGI R K, et al. Jet noise suppression [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1995, 1(2): 207-269.
[7] PAPAMOSCHOU D. Noise suppression in moderate-speed multistream jets[R]. AIAA-2002-2557, 2002.
[8] ZAMAN K B M Q. Jet noise reduction by microjets: a parametric study[J]. AIAA-2009-3129, 2009.
[9] BRIDGES J, BROWN C A. Parametric testing of chevrons on single flow hot jets[R]. AIAA-2004-2824, 2004.
[10] 单勇, 张靖周, 邵万仁, 等. 冠状喷口抑制涡扇发动机喷流噪声实验和数值研究[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1046-1056.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou, SHAO Wanren, et al. Experimental and numerical research on jet noise suppression with chevron nozzle for turbofan engines[J]. Acta

Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34 (5): 1046-1056. (in Chinese)

[11] 何敬玉,邵万仁,许影博,等. V 形槽喷管在分开式排气系统中的降噪试验[J]. 航空动力学报, 2015, 30 (2): 324-330.
HE Jingyu, SHAO Wanren, XU Yingbo, et al. Experiment of noise reduction in separate flow system using chevron nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30 (2): 324-330. (in Chinese)

[12] 何敬玉,李晓东. 锯齿型喷口抑制热喷流噪声的实验研究[J]. 推进技术, 2015, 36 (2): 167-174.
HE Jingyu, LI Xiaodong. Investigation into hot jet noise reduction mechanisms of chevron nozzles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36 (2): 167-174. (in Chinese)

[13] 汪洋海,李晓东. 超声速喷流噪声的控制方法[J]. 推进技术, 2007, 28 (2): 211-215.
WANG Yanghai, LI Xiaodong. Control methods for supersonic jet screech tones[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28 (2): 211-215. (in Chinese)

[14] 庄家煜,李晓东. 喷流噪声控制方法实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29 (4): 588-590.
ZHUANG Jiayu, LI Xiaodong. An experimental study of jet noise suppression methods[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29 (4): 588-590. (in Chinese)

[15] SAIYED N, MIKKELSEN K, BRIDGES J. Acoustics and thrust of quiet separate-flow high-bypass-ratio nozzles[J]. AIAA Journal, 2003, 41 (3): 372-378.

[16] THOMAS R H, KINZIE K W. Computational analysis of a pylon-chevron core nozzle interaction [R]. AIAA-2001-2185, 2001.

[17] KARON A Z, AHUJA K K. Effect of nozzle-exit boundary layer on jet noise[J]. AIAA-2013-0015, 2013.

[18] ZAMAN K B M Q. Flow field and near and far sound field of a subsonic jet[J]. Journal of Sound and Vibratio, 1986, 106 (1): 1-16.

[19] TAM C K W, GOLEBIOWSKI M, SEINER J M. On the two components of turbulent mixing noise from supersonic jets[R]. AIAA 96-1716, 1996.

[20] MICHAEL J D, BRENDA S H, KEVIN W K, et al. Turbulent flow field measurements of separate flow round and chevron nozzles with pylon interaction using particle image velocimetry[R]. AIAA-2004-2826, 2004.

[21] THOMAS R H, KINZIE K W. Jet-pylon interaction of high bypass ratio separate flow nozzle configurations[J]. AIAA-2004-2827, 2004.

[22] MASSEY S J, THOMAS R H, ABDOL-HAMID K S, et al. Computational and experimental flow field analyses of separate flow chevron nozzles and pylon interaction[R]. AIAA-2013-3212, 2013.

[23] BRIDGES J, BROWN C A. Parametric testing of chevrons on single flow hot jets[R]. AIAA-2004-2824, 2004.

[24] BIRCH S F, LYUBIMOV D A, MASLOV V P, et al. A RANS based jet noise prediction procedure [R]. AIAA-2007-3727, 2007.

(编辑:叶 青)