

基于传声器阵列过顶测量结果的飞机 起落架噪声研究 *

乔渭阳

Ulf Michel

(西北工业大学航空动力与热力工程系 西安 710072) (德国宇航院柏林湍流研究分部 德国 柏林 10623)

2000 年 1 月 24 日收到

摘要 应用由 111 个传声器组成的平面传声器阵列对当前流行的民用客机进场着陆过程中的机体噪声源进行了实验测量, 本文对七架窄体客机和七架宽体客机的起落架噪声进行了分析, 得到了起落架噪声的频谱特性、指向特性和声级变化。研究发现, 起落架噪声的频谱是由宽频随机噪声与一些较为明显的单音噪声源组成, 起落架噪声的指向性类似于一个水平放置的偶极子。不同飞机起落架噪声的声级相差较大, 这说明可以通过重新结构设计降低起落架噪声。

关键词 起落架噪声, 机体噪声, 飞机噪声, 传声器阵列测量

A study on landing gear noise based on the fly-over measurements with a planar microphone array

Qiao Weiyang

(Aero-engine Department of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Ulf Michel

(Turbulence Research Department, German Aerospace Center (DLR), Berlin 10623)

Abstract A large planar microphone array, which consists of 111 microphones, was successfully applied to obtain a two-dimensional mapping of the sound sources on a landing aircraft. The focus of study in this paper is on the landing gear noise source. The spectra, directivities and sound pressure levels of flap side-edge noise of 7 narrow-board commercial aircraft and 7 wide-board commercial aircraft are presented. It is found that the landing gear noise spectrum is broadband with some single tones in some cases. The directivity of the total sound pressure level of a landing gear noise resembles that of a horizontal dipole. The level differences between the various aircraft landing gears are larger than those expected from the airspeed differences. It is thus expected that the louder noise emission of the landing gears can be reduced by redesigning.

Key words Landing gear noise, Airframe noise, Aircraft noise, Microphone array measurement

* 中国航空研究院与德国宇航院科技合作项目

1 引言

经过近 20 几年来对航空发动机气动噪声的深入研究,飞机发动机的噪声辐射已经得到了显著降低。可以预见,机体噪声将成为未来飞机设计和发展过程中的重要障碍。因此,90 年代以来,国际航空界纷纷开展飞机机体噪声的研究工作^[1,2]。

气流流过起落架所产生的噪声是一个重要的飞机机体噪声源^[3]。目前,对起落架噪声的研究广泛采用实验研究方法,这是因为飞机起落架通常具有非常复杂的几何结构,围绕起落架的气流场是三维粘性并伴随复杂的旋涡运动的流场,因此,要应用目前的计算机条件和数值计算方法,通过数值求解非定常气动力学方程的方法(如 CAA (computational Aero-Acoustics) 方法)来研究起落架噪声源并找出它们的特征仍是不切实际的。根据在 DNW (German-Dutch Wind Tunnel) 风洞对全尺寸起落架噪声的实验研究结果,Dobrzynski 等人^[4]指出,结构细节和流动的相似性条件对于起落架流动噪声源的声场辐射是至关重要的影响因素,小尺寸的模型实验往往不能真实反映出实际的声源特征,因此研究起落架噪声必须进行全尺寸结构的噪声试验。

传声器阵列测量技术是近年来发展起来的研究飞机机体噪声源的一种重要方法^[1,5]。本文的目的是应用平面传声器阵列测量技术,对飞机进场着陆过程中起落架噪声进行测量分析,获得详细的全尺寸结构飞机起落架噪声源的特征,并对不同飞机的起落架噪声进行比较,从而实现对这个重要的飞机噪声源的深入认识和理解。

2 平面传声器阵列测量原理

传声器阵列就是由多个在空间确定位置上排列的一组传声器。如果一个传声器阵列记录了空间的一个声场信号 $F(\vec{x}, t)$, 其中 $\vec{x}$ 是空间

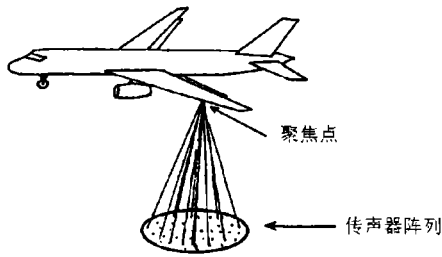


图 1 平面传声器阵列测量飞机过顶噪声示意图

变量, t 是时间变量, 而这个声场信号包含要测定的某个信号场 $S(\vec{x}, t)$ 和信号噪声 $N(\vec{x}, t)$; 即 $F(\vec{x}, t) = S(\vec{x}, t) + N(\vec{x}, t)$, 则通过对传声器阵列中每个传声器记录的信号 $Y_m(\vec{x}, t)$ 进行适当的数据处理, 可以从声场信号 $F(\vec{x}, t)$ 中分离出希望得到的信号场 $S(\vec{x}, t)$ 的有关信息, 包括这个信号场的声源位置、声压级大小、频谱特性等。对于飞机机体二维声源分布研究, 需要一个二维的传声器阵列, 即平面传声器阵列。图 1 表示应用平面传声器阵列测量飞机过顶噪声示意图。

传声器阵列信号的处理算法称为“波束成型”, 而传声器阵列的聚焦方向称为“波束”(或称为主波瓣)。对于运动的声源, 广泛采用时域“延迟与求和”波束成型算法^[5]。假设要测定的飞机机体声源在发声时刻 t_f 时的空间位置是 (x_f, y_f, z_f) , 这个声源发出的声波到达平面传声器阵列中第 m 个传感器的时刻是 $t_f + t_{pm}$, 其中 t_{pm} 是声波从声源传播到传声器位置 (x_m, y_m, z_m) 所需的时间, 则声源点在发声时间 t_f 和声传播距离 r_{ref} 时的声辐射值 $p(t_f)$ 可由下式计算,

$$\begin{aligned} p(t_f) &= \frac{\sum_{m=1}^M p_m(t_f + t_{pm}) W_m \frac{r_m}{r_{ref}}}{\sum_{m=1}^M W_m \frac{r_m}{r_{ref}}} \\ &= \frac{1}{G} \sum_{m=1}^M p_m(t_f + t_{pm}) W_m \frac{r_m}{r_{ref}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $p_m(t_f + t_{pm})$ 是在接受时间 $t_f + t_{pm}$ 时刻

第 m 个传声器的记录信号, r_m 是平面传声器阵列聚焦的声源点与第 m 个传声器在声发射时刻 t_f 时的空间距离, W_m 是第 m 个传声器信号的加权因子, $G = \sum_{m=1}^M W_m \frac{r_m}{r_{ref}}$ 。

传声器阵列测量的关键是其计算结果的空间分辨率, 即阵列输出结果分辨空间相邻声源点的能力, 也就是公式 (1) 输出结果 $p(t_f)$ 不受其他位置声源影响的能力。平面传声器阵列的空间分辨率通常是用传声器阵列对点声源响应的三维图形来描述, 这个图形是由一个主波瓣(波束)和多个小的旁瓣所构成, 主波瓣的位置是声源点位置, 旁瓣则是信号的空间混淆(见图 3), 传声器阵列设计的目的是要设法减小空间混淆, 增大主波瓣与旁瓣的差值, 抑制旁瓣。传声器阵列的空间分辨率与传声器的数目(即公式(1)中的 M)、传声器空间位置(即 (x_m, y_m, z_m) , 它影响 r_m)、声源的分布情况(即 (x_f, y_f, z_f) , 它也影响 r_m)等有关, 对于特定的声源分布, 通过增加传声器数目(即 M)和合理布置传声器位置(即分布 (x_m, y_m, z_m))可以提高传声器阵列的空间分辨率。本文把平面传声器阵列的波束成型后输出结果的主瓣与旁瓣的差作为目标函数, 测量信号的频率范围作为约束条件, 在保证目标函数在约束范围内最大的条件下, 利用随机优化计算方法, 通过编制计算机程序, 设计了 111 个传声器在平面阵列中位置, 得到的平面传声器阵列是在 $8\text{m} \times 8\text{m}$ 的一个平面上分布。图 2 表示传声器阵列中的 111 个传声器在平面中的位置分布。图 3 是平面传声器阵列对频率分别是 500Hz 和 1000Hz 的点声源的响应的三维图形, 平面传声器阵列的波束主瓣与旁瓣是空间位置坐标的函数。这个平面传声器阵列的动态范围(主波瓣与最大旁瓣的差值)在频率从 250Hz 到 3500Hz 范围之内大于 10dB。

3 实验结果分析

流动噪声的本质特征包括以下 4 个方面,

应用声学

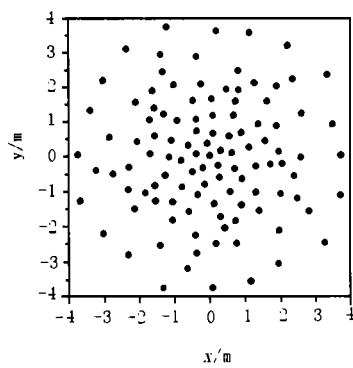


图 2 111 传声器在平面阵列中的位置

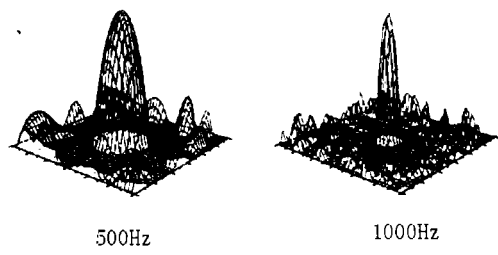


图 3 平面传声器阵列对声源的响应

(1) 声级的大小及变化; (2) 声压的频谱特征; (3) 声场的指向特征; (4) 流动速度(飞行速度)对声场的影响。声压级的大小与声源到传声器之间的距离有关, 在本文中, 所有的测量结果均用一个参考距离(100m)规范化处理。

飞机飞行过程中的声辐射问题是一个较为复杂的问题, 在飞行过程中, 飞机噪声源的声功率、声辐射距离、声辐射的极方向角度等都是随时间变化的函数, 对于这样复杂的动态过程, 要用一个完全的非定常的方法进行描述几乎是不可能的, 为了从测量结果中取得关于飞机机体噪声源的声场特征数据, 本论文将飞机飞行中的噪声辐射过程分解为许多单元过程, 在每一个飞行单元, 认为飞机机体噪声源的声辐射过程是一个稳态的过程, 辐射角度认为是平均角度, 应用一个交错重叠的 FFT 计算方法得到噪声的频谱特征和声功率谱, 通过对不同飞行单元噪声信号的分析, 再得到飞机机体

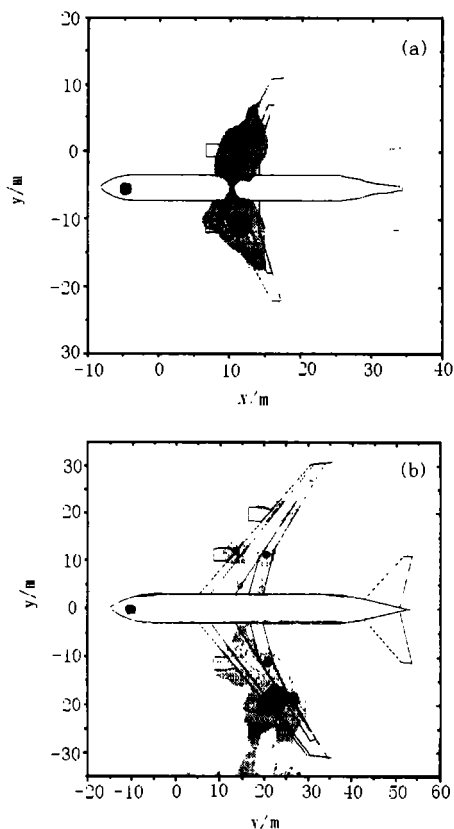


图4 飞机着陆过程中表面噪声源分布
(a) 窄体客机 NA (b) 宽体客机 WA

噪声源的指向特征^[6]。

3.1 飞机着陆过程噪声源分布

图4给出了一架窄体客机和一架宽体客机进场着陆过程时表面的声源分布。飞机表面不同位置处的声源在280Hz–3500Hz频率范围内的A加权声压级以不同灰度的颜色表示在该图中。最深的黑色位置为最大声级位置。该图所表示的飞机位置相对平面传声器阵列中心位置在90°的方向处，即飞机中心正好在传声器阵列中心位置的正上方。由图4可以看出发动机出口噪声源、起落架噪声源、襟翼侧缘噪声源等重要的飞机噪声源。图4说明应用本文的平面传声器阵列可以分辨出飞机进场着陆过程中机体表面的主要噪声源。

让平面阵列传声器聚焦在飞机前起落架位置处，本文对当前流行的民用客机（包括7架窄体客机和7架宽体客机）的起落架噪声进行

了分析，得到了起落架噪声的频谱特性、指向特性和声级变化特征。为了讨论方便，本文把7种窄体客机分别编号为NA、NB、NC、ND、NE、NF、NG，7种宽体客机分别编号为WA、WB、WC、WD、WE、WF、WG。

3.2 起落架噪声的频谱特征

图5表示几种前起落架噪声窄带频谱。该窄带频谱是飞机在90°声源辐射方向时的频谱，相邻点的频率间隔是35Hz，对应的噪声信号的采样频率是35840Hz，它是应用了21次的交叠FFT后得到的。纵坐标是襟翼侧缘噪声的A加权声压级。

图5表明起落架噪声的频谱是由宽频随机噪声与一些较为明显的单音噪声组成，例如，窄体飞机NA的起落架噪声谱中包含频率是1750Hz的强单音噪声，宽体飞机WC的起落架噪声谱中包含频率是2500Hz的明显单音噪声，而宽体飞机WE的起落架噪声谱中包含的单音噪声频率是750Hz。由图5还可以看出，不同飞机起落架噪声的频谱变化也是很明显的，这种变化包括声级大小的变化和频谱中各频率分量的分布变化。

笔者认为，起落架噪声的产生过程主要与气流绕过钝体物体后形成的非定常脱落涡有关，涡脱落引起的阻力脉动形成了窄带的噪声源，在流动速度和起落架结构细节上的任何的改变都会引起起落架噪声窄带谱（包括宽频谱和单音）的改变。而飞机NA起落架噪声谱中非常强的单音噪声源（频率1750Hz）则可能是由于起落架舱形成的空腔噪声，这种强单音噪声在由同一飞机制造公司生产的类似的3种型号的飞机起落架噪声谱中均有发现（飞机NA、NB和NC，NB和NC飞机起落架噪声谱中的强单音频率分别是1715Hz、1820Hz），对这种噪声源的产生机理还需要进一步的研究，如果这种声源确实是由起落架空腔形成，则可以通过关闭空腔的方法消除。

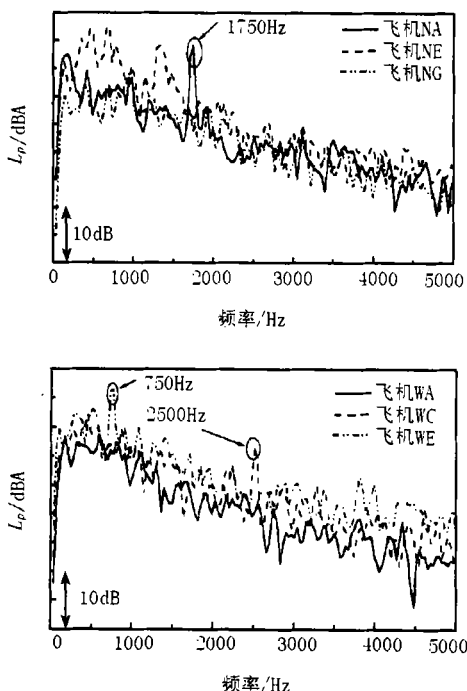


图5 飞机起落架噪声的频谱比较

3.3 起落架噪声的指向特征

图6给出了测量的7架窄体客机和7架宽体客机前起落架噪声的指向特征。这里的方向角度是指飞机声源点（即起落架位置）到平面传声器阵列中心位置的方向矢量与水平线的夹角，当飞机位于平面传声器阵列之前，即飞机还未飞到平面传声器阵列上空，指向角度定义为小于 90° （前弧区），当飞机飞过平面传声器阵列，指向角定义为大于 90° （后弧区），不同辐射角度的测量结果均是用相同的声音传播距离（100m）规范化。

图6表明起落架噪声在 90° 度辐射角位置噪声级最小，随着观察点向前弧区和后弧区的移动，起落架噪声级是逐渐增加的。这个测量结果与 Dobrzynski 等^[4]在风洞中测量得到的飞机起落架噪声的指向性类似，如 Dobrzynski 所指出的，如果起落架的噪声是由起落架轮胎后大尺度的脱落涡引起的，那么声源的特性就应是一个垂直方向的偶极子，最大噪声的位置应在 90° 的辐射角度，然而，测量结果与这个分

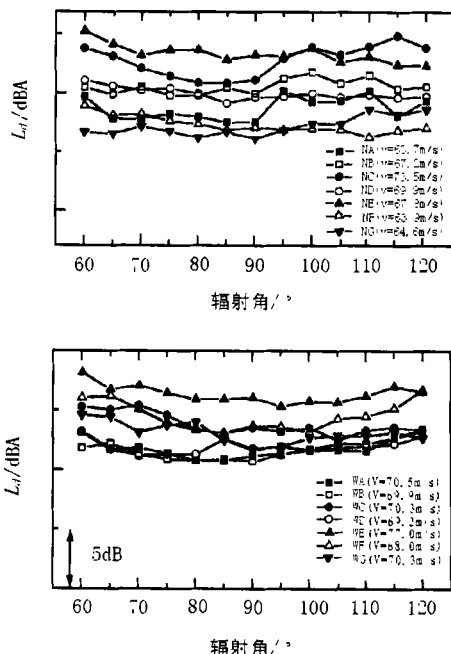


图6 起落架噪声的指方特征

析相反。笔者认为，起落架噪声的特性更象是一个水平放置的偶极子，这个偶极子的声源是由于非流线型的起落架结构引起的空气阻力产生的。如果消除了运动放大效果，那么图6所示的指向性后弧区的声级会再增加2-3dB，因此起落架噪声场中最大噪声出现在后弧区，这是因为，在起落架后部产生较强的流动脉动，由于起落架的屏蔽作用，这个脉动流场向后弧区辐射较强声级。

由图6还可以看出，不同飞机的起落架噪声声级相差较大，对于7架窄体客机，起落架噪声的最大差值可达7dB，对于7架宽体客机，起落架噪声最大相差6.5dB。这种差别部分似乎是由于飞机速度相差造成的，但是，如果应用偶极子的声级与流动速度6次方的关系对以上飞机的噪声级作一分析，就会发现，流动速度可能引起起落架噪声的差别比测量结果的差值小得多，因此，不同飞机起落架噪声之间的差值主要是由于起落架结构尺寸和结构细节的差别造成的，这就告诉我们，可以通过对起落架的结构重新设计降低其噪声辐射。

4 结论

平面传声器阵列测量技术成功地应用于飞机进场时噪声源的测量,在飞机机体上的重要噪声源都被揭示出来。本文对当前流行的民用客机(7架窄体客机和7架宽体客机)的起落架噪声进行了分析,得到了起落架噪声的频谱特性、指向特性和声级变化特征。

参 考 文 献

- 1 Delfs J, Heller H. Aeroacoustics research in Europe - 1996 highlights. Progress of Aerospace Science and Technology, 1998; 2:145-154.

- 2 Macaraeg M G. Fundamental investigations of airframe noise. AIAA paper 98-2224, 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, 1998.
- 3 Crighton D G. Airframe noise. NASA RP-1258, Vol. 1, August 1991, 391-447.
- 4 Dobrzynski W, Buchholz H. Full-scale noise testing on airbus landing gears in the German Dutch wind tunnel. AIAA paper 97-1597-cp. 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlanta, Georgia, 1997.
- 5 Michel U, Barsikow B, Helbig J, et al. Fly-over noise measurements on landing aircraft with a microphone array. AIAA paper 98-2336, 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, 1998.
- 6 乔渭阳. 基于平面传声器阵列测量的机翼噪声源的研究. 博士学位论文, 西北工业大学, 1999.

(上接第 30 页)

C_{2T} 计算公式进行修正以消除人体软组织影响。对胫骨中超声横波和纵波速度的具体比值尚需作进一步研究。

5 结束语

国外一些研究表明,胫骨定量超声检测技术(QUS)是一项精确度高,无放射性的技术,和DEXA, SPA测定的结果具有相关性[7]。DPA可无损地测出人体深部骨骼的骨密度,比SPA准确度高[2]。QCT的最大优点是可将皮质骨和松质骨完全分离,单独测量骨小梁的变化,在诊断和检测病变应用中有较大优势。但QCT辐射剂量高达1000-3000mRem,且费用昂贵,不适于普及[2]。与其他诊断骨质疏松症的方法相比,定量超声技术(QUS)可从一种新的角度评估人体的骨质量,较适于用作骨密度测定前的筛选设备。超声技术在骨质疏松症估测方面可以在现有诊断技术得到的信息基础上提供一些有价值的附加信息。且超声系统成本低,便携,无放射性损害,非常适于

携带出诊和普查检测。超声技术应用于骨密度检测领域,已日益为学术界所接受。但此项技术在国内医疗器械领域仍为空白,医院所用同类仪器全为进口,且价格昂贵,维护困难。故其研究开发前景良好,可根据要求开发成适于出诊携带的便携机和医院内检测的台式机,以填补国内无自己产品的空白。

参 考 文 献

- 1 明天国际医疗机构. 骨质疏松症诊断设备, 世界医疗器械, 1998, 4(10): 74.
- 2 詹前进. 世界医疗器械, 1999, 5(2): 46.
- 3 Stegman M R, Heaney R P, Travers-Gustafson D, et al. Cortical ultrasound velocity as an indicator of bone status. Osteoporosis Int (1995) 5: 349-353.
- 4 冯若. 超声诊断设备原理与设计. 北京: 中国医药科技出版社, 1993. 244.
- 5 张凯等. MCS-51单片机综合系统及其设计开发. 北京: 科学出版社. 1996. 266-267.
- 6 冯元桢. 生物力学. 北京: 科学出版社, 1983. 242-245.
- 7 Foldes A J, Rimón A, Keinan D D, et al. Quantitative ultrasound of the tibia: a novel approach to assessment of bone status, Bone 17, 1995: 363-367.