

# 微穿孔板消声器 在 MA60 飞机 APU 排气管的应用

王占学, 乔渭阳, 李文兰

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 对 MA60 飞机 APU 排气噪声进行了测量, 从测量结果可以看出, 无论 APU 工作在何种工作状态, 排气噪声均属于宽频噪声, 主要是 1000 Hz 以上的高频噪声, 而满负载状态下的排气噪声除了高频含量之外, 在 400~1000 Hz 范围内也有较强的噪声。为了降低 APU 的排气噪声并结合 APU 具体的安装限制, 选择了微穿孔板消声器来降低 APU 的排气噪声。通过试验比较, 表明采用微穿孔板消声器降低 MA60 飞机 APU 排气噪声的效果是非常理想的。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 排气噪声; 微穿孔板消声器; 噪声频谱

**中图分类号:** 216.5<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

## Application of Microporous to Reducing Exhaust Noise of APU on MA60 Aircraft

WANG Zhan-xue, QIAO Wei-yang, LI Wen-lan

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The exhaust noise radiation of APU (Auxiliary Power Unit) on MA60 aircraft is serious. Effective sound treatment technology should be employed to control the exhaust noise. The measured spectrum of APU exhaust noise shows that typical exhaust noise spectrum is very broad. Two general regions can be distinguished. A broad hump of low frequency random noise centering in the 400~1000 Hz region normally is present, which often is substantially stronger when fully loaded. A second broad hump of high frequency random noise centers in speech interference region of 1000~5000 Hz, which is the frequency range of the ear's greatest acuity. Considering the measured spectrum and APU equipment, a microporous muffler is used for reducing of APU exhaust noise. The measured results show that the effect of microporous muffler for noise reduction of APU exhaust is very satisfactory.

**Key words:** aerospace propulsion system; APU exhaust noise; microporous muffler; noise spectrum

## 1 引言

MA60 飞机在停机待客过程中, APU (辅助

动力装置) 的噪声辐射较为严重, 影响了 MA60 飞机的形象。为了改善飞机在地面停机状态的环境质量, 需通过一定的降噪措施, 降低 APU 的噪

**收稿日期:** 2002-07-10; **修订日期:** 2003-01-01

**作者简介:** 王占学(1969-), 男, 辽宁建平人, 西北工业大学航空动力与热力工程系副教授, 博士, 主要从事发动机总体、计算流体力学及气动噪声的研究。

声辐射。根据 APU 实际安装条件,对 MA60 飞机 APU 排气消声器的降噪要求是:在不改变发动机短舱结构和 APU 安装条件的情况下,要求 APU 系统安装排气消声器结构后 A 加权噪声级降低 3 dB(A)。

MA60 飞机的辅助动力装置 (APU) GTCP36-150 系列实际上是一台小型涡轴发动机<sup>[1]</sup>,其排气噪声包括燃烧噪声、涡轮噪声和喷流噪声,总噪声所含频率范围较宽,总噪声级较高。

根据 APU 排气噪声属于宽频噪声的特点及安装的限制,在实际过程中采用了微穿孔板消声器来降低 APU 的排气噪声。通过在机场对安装消声器和未安装消声器的 APU 排气管喷流噪声的测量,表明采用微穿孔板消声器降低 MA60 飞机 APU 排气噪声的效果是非常理想的。

## 2 APU 排气源噪声测量和分析

### 2.1 实验条件、测量系统概述

实验在西安飞机集团公司机场上进行,排气管道为现使用的钛合金硬壁弯管。测量系统包括传声器—延伸电缆—声级计—计算机,如图 1 所示。

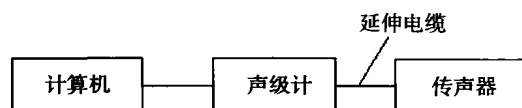


图 1 测量系统  
Fig. 1 Measurement system

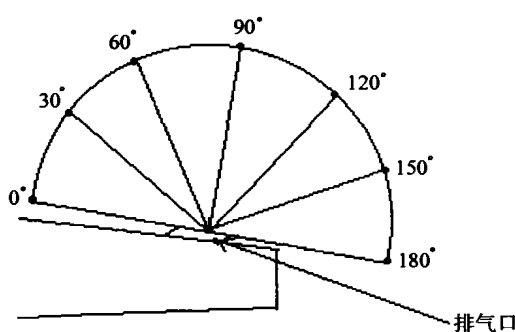


图 2 测点布置  
Fig. 2 Microphone locations for exhaust noise test

测量点的布置原则是:既能获取源噪声的频谱特性和指向性,又要尽可能避免排气流的冲击。最终选定的测点布置如图 2 所示,即在排气口外侧 180° 范围内每隔 30° 布置一测点,所有测点在

同一水平面内,传声器距离排气管出口中心 1 m,传声器离地高度都是排气口最高点再加 100 mm,传声器轴线顺气流方向,感受面指向下游。

实验的 APU 工作状态有满载状态和轻载状态。每个 APU 工作状态下测量 0°~180° 范围内 7 个测点的声级和频谱信号,每点重复记录 3 次。

### 2.2 测量结果和分析

APU 轻载工作状态下,60° 和 120° 两个位置上排气噪声的 A 加权频谱特性为图 3 所示,相应的 1/3 倍频程频谱如图 4 所示。APU 满载工作状态下,60° 和 120° 两个位置上排气噪声的 A 加权频谱特性为图 5 所示,相应的 1/3 倍频程频谱如图 6 所示。

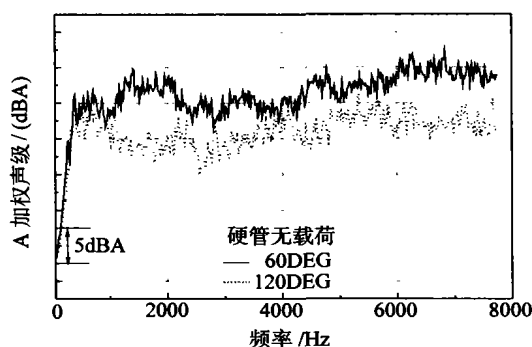


图 3 原排气噪声源频谱(轻载)  
Fig. 3 The noise spectrum of APU exhaust noise at no loads

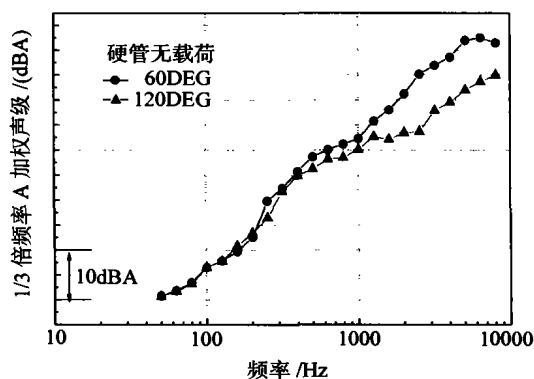


图 4 原排气噪声源 1/3 倍频程频谱(轻载)  
Fig. 4 The 1/3 octave spectrum of APU exhaust noise at no loads

由图 3~图 6 可见,不论在哪一种工作状态,APU 的排气噪声均属于宽频噪声。轻负载状态下的排气噪声主要是 1000 Hz 以上的高频噪声,而满载状态下的排气噪声除了高频含量之外,在

400~1000 Hz 范围内也有较强的噪声。

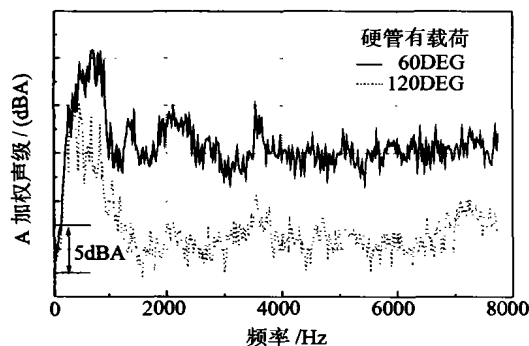


图 5 原排气源噪声频谱(满载)

Fig. 5 The noise spectrum of APU exhaust noise at loads

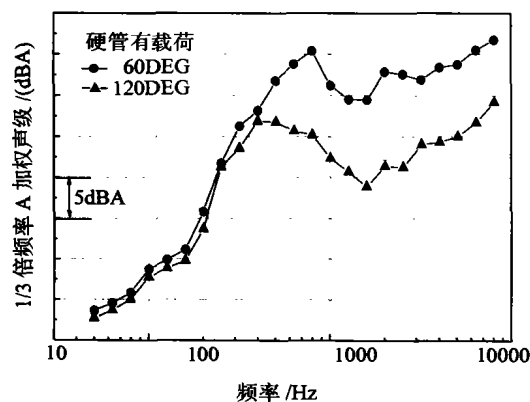


图 6 原排气噪声源 1/3 倍频程频谱(满载)

Fig. 6 The 1/3 octave spectrum of APU exhaust noise at loads

### 3 消声器方案设计

消声器设计的主要依据是消声器的声学性能设计指标和源噪声的频谱特性。MA60 飞机 APU 排气消声器的设计指标为排气口外空间平均 A 加权声级降低 3 dB(A), 而 APU 排气源噪声如前所述为宽频噪声, 覆盖的频率范围较宽, 若兼顾空载满载两种工作状态下的降噪效果, 则要求设计的 MA60 飞机 APU 排气消声器应覆盖 400~10000 Hz 很宽的频率范围。作为空气动力性噪声的消声器, 可供选择的类型很多, 包括阻性消声器、抗性消声器, 及微穿孔板吸声结构组成的阻抗复合型消声器。各类消声器各有其自身的特点和应用场合, 对 MA60 飞机 APU 的排气噪声, 因为气流速度大、温度高、空间尺寸及消声器重量有严格的限制, 分析认为, 阻性消声器无法适应这样的环境; 发动机短舱尺寸无法安排扩张式消声器; 而

普通穿孔板共振腔式消声器 又因为消声频带太窄无法满足要求。经分析研究, 决定 MA60 APU 的排气消声器采用微穿孔板吸声结构, 因为这种消声器结构简单, 对气流影响小(损失小), 可以在高温高速下长期工作, 而且通过结构参数的选择还可以在一定的范围内控制消声频段和消声量, 它较适合 MA60 飞机 APU 具体条件下的应用。

#### 3.1 微穿孔板消声器的结构参数和性能参数

本研究在设计微穿孔板消声器的过程中主要是依据马大猷和方丹群的理论分析方法<sup>[2~6]</sup>, 并编制成计算程序, 根据测量的 MA60 飞机 APU 排气噪声频谱进行设计。根据计算结果得到以下结论:

(1) 后共振腔深度  $H$  对共振频率影响最大,  $H$  越大, 共振频率越低, 参数组合得好, 还可以使最大吸声系数略有增加, 吸声带宽有所增大。

(2) 微孔直径  $d$  主要影响声阻率, 对共振频率影响很小, 在一定的参数范围内,  $d$  越小, 半吸声带宽越大, 但最大吸声系数有所降低。

(3) 穿孔率  $p$  的影响不可忽视, 在一定参数组合下, 增大穿孔率可使共振频率增大, 使最大吸声系数也略有增加。

(4) 微穿孔板的厚度  $t$  在 1 mm 左右时, 对吸声特性影响不大。

根据 APU 排气消声器设计的约束条件, 在不改变原有排气管道形状的条件下, 可以考虑安排消声结构的部位有: 进口引射锥段、转折 42° 的弯管段和出口直管段, 其中只有进口锥段允许安置较大的腔深尺寸。为了覆盖较宽的频率范围, 三段选取三组不同的参数组合:

圆锥段:

$$\begin{aligned} d &= 1 \text{ mm} , \quad t = 0.8 \text{ mm} \\ H &= 65 \text{ mm} , \quad p = 5\% \end{aligned}$$

弯管段:

$$\begin{aligned} d &= 1 \text{ mm} , \quad t = 0.8 \text{ mm} \\ H &= 15 \text{ mm} , \quad p = 1\% \end{aligned}$$

直管段:

$$\begin{aligned} d &= 1 \text{ mm} , \quad t = 0.8 \text{ mm} \\ H &= 10 \text{ mm} , \quad p = 1\% \end{aligned}$$

这三段吸声结构的吸声系数曲线如图 7 所示。计算它们的最大正入射吸声系数约为 0.8935, 0.991, 0.9985, 对应的频率分别为 437, 2065, 2543 Hz。

#### 3.2 消声器方案

根据 APU 安装短舱的实际情况, 圆锥段的

吸声结构长度取  $l_1 = 130$  mm, 弯管段长度则取  $42^\circ 14'$  对应的圆弧段, 弯管曲率半径为 500 mm, 按轴心线计算的折合长度为 366 mm, 取  $l_{2\text{折合}} = 300$  mm, 直管段由于空间限制, 吸声结构只包围长边的半圆。图 8 为整个排气管的示意图, 虚线部分表示单层微穿孔板吸声结构。由于受排气温度的限制, 未采用蜂窝结构。

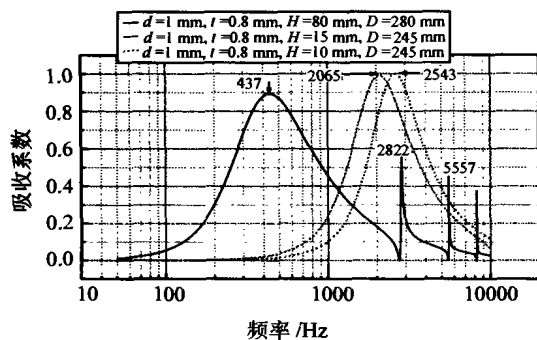


图 7 三种吸声结构的

Fig. 7 The  $\alpha$ - $f$  of three segment configurations

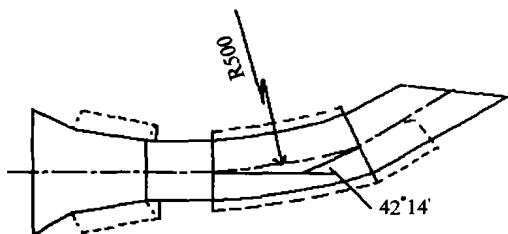


图 8 微穿孔板消声器示意图

Fig. 8 Example of microporous muffler

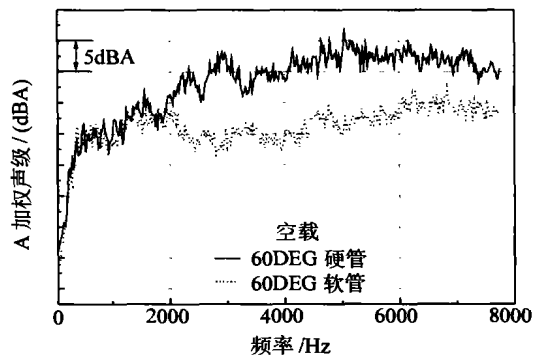
根据文献[2]提出的理论分析和计算, 图 8 所示三段吸声结构的总降噪可以达到约 7 dBA, 采用钛合金材料, 重量比原来的排气管增重约 2.2 kg。

#### 4 排气消声器装机实验

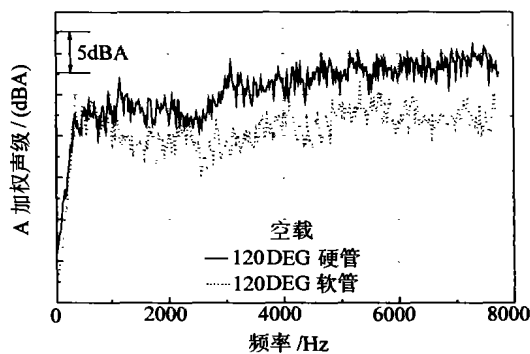
除了把原有的硬壁排气管换成带消声器的排气管道外, 实验场地、测量系统、测点布置及 APU 工作状态均与源噪声测量时一样。部分测量结果如图 9、图 10 所示, 图中硬管表示未装消声器的 APU 排气管道, 软管表示安装消声器的 APU 排气管道。

图 9(a)和(b)为  $60^\circ$ 和  $120^\circ$ 位置上, APU 轻载工作状态下, 原排气管和带消声器排气管的排气噪声频谱的对比; 图 9(c)和(d)是 APU 满负载工作条件下, 两种排气噪声频谱的对比。图 10 为对应情况下两种排气噪声  $1/3$  倍频程 A 加权声

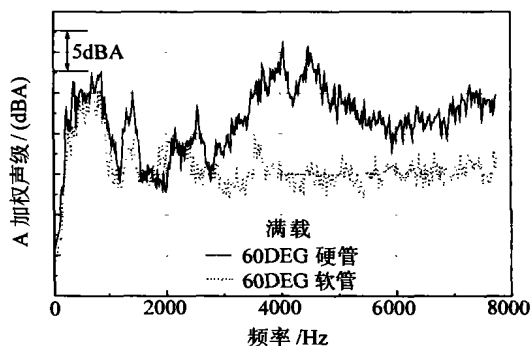
级的比较。



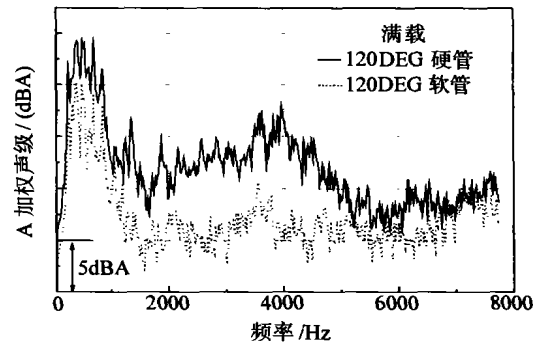
(a)  $60^\circ$  空载频谱对比



(b)  $120^\circ$  空载频谱对比



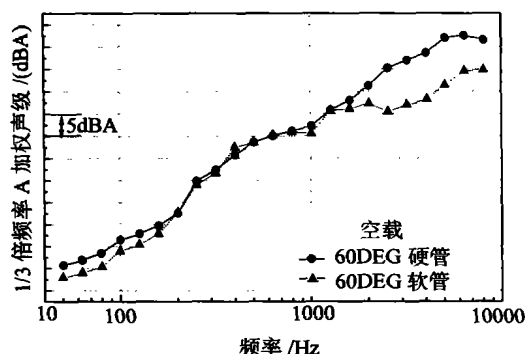
(c)  $60^\circ$  满载频谱对比



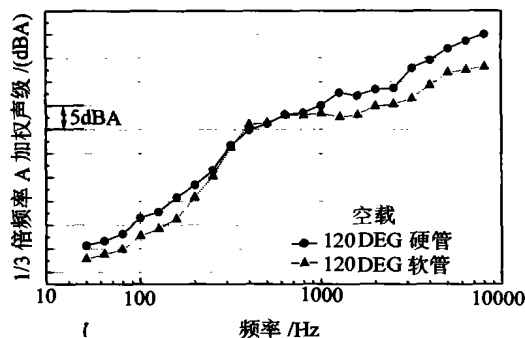
(d)  $120^\circ$  满载频谱对比

图 9 安装消声器前后的噪声频谱对比

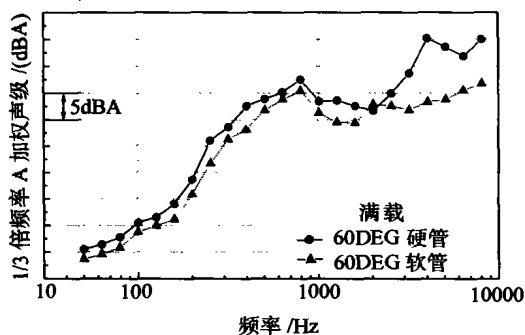
Fig. 9 Comparison of noise spectrum of exhaust noise with mufflers and without mufflers



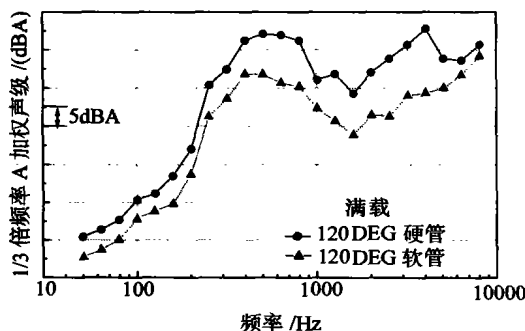
(a) 60° 空载 1/3 倍频程频率比较



(b) 120° 空载 1/3 倍频程频率比较



(c) 60° 满载 1/3 倍频程频率比较



(d) 120° 满载 1/3 倍频程频率比较

图 10 安装消声器前后的 1/3 倍频程频谱对比

Fig. 10 Comparison of 1/3 octave spectrum of exhaust noise with mufflers and without mufflers

由图 9、图 10 可见,在很宽的频率范围内,尤其是 1000~4000 Hz 之间,消声器的降噪效果良好,与理论分析和计算的结果一致。

测量结果表明,APU 轻负载工作状态下,所有测点的空间平均 A 加权声级平均降低 7.2 dBA,APU 满负载工作状态下,所有测点的空间平均 A 加权声级平均降低 4.3 dBA。

## 5 结 论

经过现场测量的 APU 噪声频谱,可以看出,APU 噪声具有明显的宽频特征,结合 APU 的具体安装,采用了微穿孔板消声器降低 APU 的排气噪声。试验测量结果证明,所设计的 MA60APU 排气消声器达到设计的预期目标,排气口外 0°~180°指向范围内的 A 加权平均声级降低了 7.2 dBA(轻负载)和 4.3 dBA(满负载)。

## 参考文献:

- [1] Gas Turbine Auxiliary Power Unit Model GTCP36-150 Series Installation Manual[Z]. Garrett Turbine Engine Company, 1987.
- [2] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975, (1): 38-50.
- [3] 马大猷. 微穿孔板结构的设计[J]. 声学学报, 1988, 3(3): 174-180.
- [4] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 22(5): 385-393.
- [5] 马大猷. 微穿孔吸声体随机入射吸声性能[J]. 声学学报, 2000, 25(4): 289-296.
- [6] 方丹群. 噪声控制[M]. 北京: 北京出版社, 1986.