

# 民机驾驶舱扬声器啸叫成因研究与抑制方法

陈泽\* 江凯丽

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘要:** 民用飞机驾驶舱扬声器是一个电声换能器件,安装在飞机驾驶舱中,可将电信号转为声信号输出,并将声学功率辐射到驾驶舱。驾驶舱扬声器不仅能够为驾驶舱内的机组人员提供与客舱乘务人员以及塔台管制人员的通话语音,还能够提供飞行导航音、选呼音和告警音的发声。因此,驾驶舱扬声器是飞机上不可或缺的机载设备,为飞机的飞行安全提供了保障。驾驶舱扬声器产生的尖锐刺耳啸叫让人难以忍受,导致飞行机组无法听到其他声音,甚至无法使用语音通信系统,严重时会影响飞行安全。指出驾驶舱扬声器“啸叫”的危害,分析啸叫的成因,并在此基础上探讨驾驶舱扬声器“啸叫”的抑制方法,为民机驾驶舱音频系统的防啸叫设计提供一定的参考依据。

**关键词:** 驾驶舱扬声器;啸叫;声反馈抑制;音频系统

中图分类号: V243

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

“啸叫”<sup>[1-3]</sup>,即是扩声系统放出的声波有一部分被受话器收声串入系统内部,当声波信号满足自激振荡的条件时,即使没有外部输入,扩声系统也会发出尖锐的单频音,这就是啸叫现象。啸叫现象在扩声系统中非常常见,啸叫会破坏音响的效果,影响在场人员的听觉感受;而且啸叫时间长了,音响、功放等设备很容易因信号过强而烧毁损坏。这种现象直接制约了扩声系统的音量最大增益,是扩音技术的难点、痛点。

## 1 飞机啸叫现象危害

在民用飞机上,当扬声器打开机组成员发话同时侧音(自听音)处于激活的状态时,驾驶舱内的麦克风、音频放大设备、扬声器构成一个典型的扩音系统。驾驶舱是一个封闭的小空间,扬声器与麦克风离得近,如果设计时不做考虑,很容易产生“啸叫”现象<sup>[4-5]</sup>。啸叫的危害很大:

1) 驾驶舱被尖锐刺耳的啸叫声淹没,会使飞行

机组难以忍受且听不到其他声音,甚至无法使用语音通信和音响告警系统,影响飞行安全;

2) 啸叫时输入信号过强,时间一长容易烧毁音频功放及扬声器,减少设备使用寿命。

当驾驶舱发生啸叫时应立即将激活的麦克风远离扬声器,松开麦克风按压发话开关(PTT),如再需要发话可调小扬声器音量,或者关闭扬声器并使用耳机监听。

## 2 啸叫生成条件

当声音信号通过扩声喇叭输出时,经过周围物体的反射与折射,再次进入麦克风作为信号输入,即产生反馈信号。当产生的反馈信号相位与原有信号相位相同时,输入信号将被放大,反馈信号幅度大于原有信号幅度,如此循环往复,将输入信号不断放大,将产生自激振荡,即啸叫现象<sup>[5]</sup>。

简单来说,啸叫产生的条件需要满足以下三点:

- 1) 扩声喇叭与送话器同时工作;
- 2) 喇叭发出的声音通过空间可以传到送话器;

\* 通信作者. E-mail: chenze@comac.cc

引用格式: 陈泽,江凯丽. 民机驾驶舱扬声器啸叫成因研究与抑制方法[J]. 民用飞机设计与研究,2021(1):102-105. CHEN Z, JIANG K L. Research on the causes of cockpit loudspeaker howling in civil aircraft and suppression methods[J]. Civil Aircraft Design and Research,2021(1):102-105(in Chinese).

3) 扩声喇叭发出的声压足够大,麦克风的灵敏度足够高;

总结其产生的原因的本质,啸叫产生必须同时满足以下两点:

1) 相位条件:反馈到传声器的声波信号与传声器原声输入的声波信号同相位;

2) 振幅条件:反馈增益大于1,即声反馈环路为正反馈。

$S_{in}$ 是音源信号,即希望被扩声系统放大的信号; $S_{fb}$ 是反馈信号,是不希望被放大的信号; $S_{sum}$ 是反馈信号和音源信号之和; $F(z)$ 是反馈路径。当满足正反馈产生的条件时,扩声系统将产生自激振荡,这种现象被称为啸叫<sup>[6-7]</sup>。

系统输出至扬声器的信号见式(1):

$$S_{out} = S_{sum} \times A(z) = (S_{in} + S_{fb}) \times A(z) \quad (1)$$

反馈信号见式(2):

$$S_{fb} = S_{out} \times F(z) \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)得:

$$S_{out} = S_{in} \times A(z) + S_{out} \times F(z) \times A(z) \quad (3)$$

由式(3)得闭环传递函数:

$$H(z) = \frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{A(z)}{1 - F(z) \cdot A(z)} \quad (4)$$

闭环传递函数存在闭环极点。扩声系统的开环传递函数为:

$$T(z) = F(z) \times A(z) \quad (5)$$

如果公式(4)的极点出现在单位圆外或单位圆上时,则表示系统不稳定<sup>[8]</sup>。根据 Nyquist 原理,得到系统的振荡条件为:

$$\begin{cases} T(\omega) \geq 1 \\ \angle T(\omega) = 2k\pi \end{cases} \quad (6)$$

式中, $k$ 为整数。

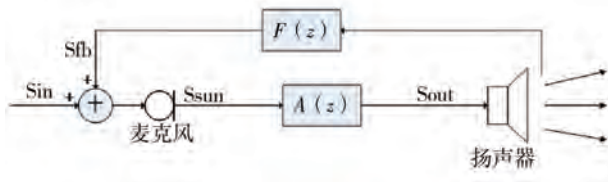


图1 正反馈框图

公式(6)中的两个公式分别表示扩声系统出现自激振荡现象的相位条件和幅度条件,只有当输入信号频率满足公式(6)时,才会产生自激振荡。如图1所示,首先,声源信号经过信号处理模块,信号

处理模块对信号进行处理并放大后,再通过扬声器输出,由于周围环境物体的折射和反射,有一部分信号反馈到麦克风。当反馈到麦克风的信号中有部分频率分量相位刚好移动  $2k\pi$ ,且幅度保持不变,就同时满足了系统产生自激振荡的相位条件和幅度条件。此时,即使麦克风没有输入信号,反馈信号也会持续输入,扬声器发出尖锐的单频音,系统就会产生啸叫<sup>[9-10]</sup>。

### 3 避免啸叫的方法

#### 3.1 断开环路

根据上文分析的啸叫成因,只要在任意环节断开正反馈环路就可以消除啸叫。

空客 A319 和 A320 系列飞机的处理方法是,当驾驶舱机组成员使用手持话筒发话时,扬声器会自动静默侧音(即机组成员的手持话筒 PTT(按压发话)信号会抑制扬声器侧音发声)。针对侧音,这种措施使驾驶舱内的扬声器及手持话筒不同时工作,建立不了扩音系统,扬声器不出声,自然不会产生啸叫。

#### 3.2 从环境上来减轻

驾驶舱空间不大,声波扩散不良,扬声器发出的声音被内饰表面反射甚至共振加强串入麦克风,一旦相位幅值条件满足公式(6),就会出现啸叫。所以驾驶舱内饰使用吸声材料,减小反射回麦克风的的声音是有必要的。

驾驶舱的具体形状和实际的声学状况,都有可能是啸叫的形成原因。分析时,可将驾驶舱视为一个声学共振腔体,部分声音信号会在腔体共振的作用下有一定程度的加强。考虑到驾驶舱形状和容积不同,根据建声原理,不同驾驶舱的共振频率(此频率声音在原本基础上得到加强)也是不尽相同。另外,针对驾驶舱内部不同的内饰吸声材料和吸声结构,对不同频率声音的反射能力和吸收能力也不同,且不同材料之间的差别往往很大。由此可以看出,驾驶舱内声学状态对于飞机音频系统的声音信号反馈起着相当重要的作用。

#### 3.3 扬声器布置

使麦克风远离扬声器,显然能避免啸叫现象产生。这就对扬声器的布置提出了要求,需要结合驾驶舱实际的声学环境进行布置,扬声器指向角度避开发声源,即避免直接指向飞行员正常坐姿发话时使用的

麦克风;同时要保证扬声器不能太远离飞行机组的耳朵,过远导致飞行员听到扬声器的音量变小。

### 3.4 适当降低灵敏度和扬声器音量

麦克风的灵敏度高,更容易出现啸叫;需要注意的是,扩音系统是否出现啸叫并不是由麦克风的灵敏度决定的。虽然降低扬声器音量也是避免啸叫的一种手段,但这样会直接降低了驾驶舱音量,可能导致飞行员无法听清。这也说明大音量增益和防啸叫在工程设计中是需要折衷的。

### 3.5 扩声系统内部

#### 1) 使扩音系统的频响曲线平坦

使扩音系统的频响曲线尽量平坦,消除曲线尖峰现象。任何一套扩音系统,都做不到理想平直的幅频响应曲线。实际的系统幅频响应曲线会在某些频率点出现尖峰毛刺,音频信号在这些尖峰处的频率点过

度放大,所以扩声时在这些信号过度放大的频率点就容易产生自激震荡,出现音响系统啸叫<sup>[3]</sup>。

#### 2) 声反馈抑制技术

音响系统出现啸叫是由于正反馈使音频信号中的某些频点不断被加强而造成的,如果把这些频点分量滤除或进行大幅度衰减,就可以有效抑制声反馈。反馈抑制器正是根据这一思想设计的。反馈抑制器工作原理是:利用计算机技术快速扫描、自动寻找出发生啸叫的音频信号频率,并自动生成一组与这些啸叫频率相同的窄带滤波器来滤除啸叫频率信号,从而达到自动抑制啸叫、消除声反馈的目的。

如图 2 所示,一个典型的反馈抑制器是由模数转换 A/D 变换器、窄带数字滤波器组、数字信号处理器、反馈中心频率检测器以及数模转换 D/A 变换器等组成。

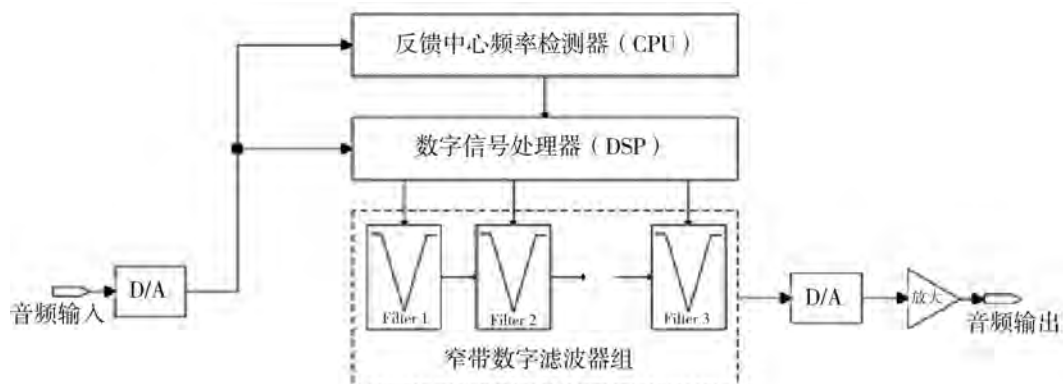


图 2 反馈抑制器原理框图

音频信号由 A/D 转换器转换成数字信号后,分别送入数字信号处理器和反馈中心频率检测器;反馈中心频率检测器不断地对输入的数字音频信号进行快速扫描,自动搜寻啸叫频率;一旦找到啸叫频率,反馈中心频率检测器就会立即控制数字信号处理器设定这一频率,使用一个与该频率相同的窄带数字滤波器来滤除或衰减这个频率信号,从而抑制声反馈啸叫<sup>[5]</sup>。

虽然在窄带数字滤波器滤除啸叫频率的同时,音频信号中的这一频率也被滤除掉了,但由于窄带数字滤波器的频带非常窄,滤除啸叫频率这一过程对音频信号的频谱影响小,对音频信号的音质影响小。

#### 3) 自适应声反馈消除技术

如果能直接在音频设备内部识别出反馈信号,并将反馈信号滤除,可以更好的保证音频信号的音

质<sup>[5]</sup>。自适应声反馈消除技术的主要原理是使用自适应滤波器对反馈声音信号进行近似逼近,最后在输入端得到的混合信号(混合信号包含了反馈信号)中减去滤波器生成的近似反馈声音,以此达到抑制声反馈的目的。如图 3 所示,是一个典型的自适应声反馈消除原理框图。其中, $H(z)$ 表示参数可调滤波器,跟随  $S_c$  信号自适应调整; $S_{in}$ 为整个扩声系统真正需要放大的信号; $S_{fb}$ 为声反馈信号; $S_{sum}$ 为麦克风信号; $S_{out}$ 用以驱动扬声器并作为滤波器

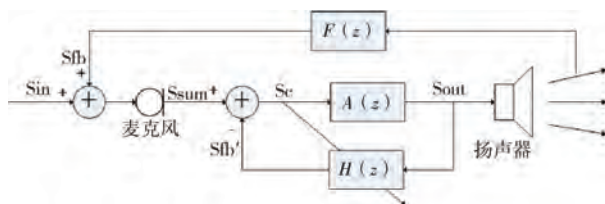


图 3 自适应声反馈消除原理框图

$H(z)$ 的输入; $S_{fb}$ 为自适应滤波器 $H(z)$ 对声反馈信号 $S_{fb}$ 的估计。 $S_{fb}$ 近似等于 $S_{fb}$ ,从而保证送入 $A(z)$ 进行放大的信号 $S_e$ 近似等于需要放大的有用信号 $S_{in}$ 。这种方法对音频信号的频谱影响很小,所以几乎不影响音频信号的音质。

## 4 结论

在设计之初如果未考虑周全,在飞机驾驶舱这样的封闭小空间,很容易产生“啸叫”现象。啸叫的危害很大,不仅影响到音频设备使用寿命及严重时还会影响到飞行安全。

除了使用吸音材料、扬声器布置等物理方法,在机载音频设备内部集成声反馈抑制算法也是避免音频系统出现啸叫的有效办法。

### 参考文献:

- [1] 李波. 自适应滤波器在反馈啸叫抑制中的应用研究[D]. 北京:中国科学院声学研究所,2006:20-25.  
 [2] 刘育烽. 声反馈控制的研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.  
 [3] 黄振益. 音响系统“啸叫”的形成原因与消除方法

[J]. 电子世界,2014(12):350-351.

- [4] 郝国莉. 声反馈啸叫抑制算法的研究[D]. 南京:南京大学,2012:1-5.  
 [5] 郝国莉,方元. 采用改进陷波器的声反馈抑制[J]. 电子测量技术,2012,35(3):65-68.  
 [6] 毕云龙. 自适应声学回声抑制算法研究及其VLSI芯片设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:5-7.  
 [7] 史玲玲. 数字音频反馈抑制器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011.  
 [8] 王凤刚. 自适应声反馈抑制算法的研究[D]. 成都:电子科技大学,2006.  
 [9] 戴长安,冯传岗. 扩声系统中的声反馈抑制及均衡处理[J]. 电声技术,2007,31(11):1-5.  
 [10] 陈金坤. 室内扩声系统声反馈形成机理及抑制方法[J]. 中国教育技术装备. 2005(3):3-4.

### 作者简介

陈泽男,硕士研究生,高级工程师。主要研究方向:机载音频系统。E-mail: chenze@comac.cc

江凯丽女,硕士研究生,助理工程师。主要研究方向:内话系统、机载音频系统。E-mail: jiangkaili@comac.cc

## Research on the causes of cockpit loudspeaker howling in civil aircraft and suppression methods

CHEN Ze\* JIANG Kaili

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** The cockpit loudspeaker of civil aircraft is an electrical-acoustic transducer, which is installed in the aircraft cockpit. It can convert the electrical signal into an acoustic signal and radiate the acoustic power to the cockpit. Cockpit loudspeakers can not only provide communication voice between cabin crew and tower control personnel, but also provide navigation sound, Selcall voice and aural warning to pilot. It is an indispensable airborne device, which provides guarantee for flight safety. The squeal of cockpit loudspeaker is so unbearable that the pilots cannot hear other sounds, or even cannot use the voice communication system, which can seriously affect flight safety. This paper points out the harm of the cockpit speaker squeal, analyzes the cause of squealing. And on this basis, this paper discusses the inhibition method of the squeal, which provides some reference for the design of acoustic feedback inhibition of civil aircraft cockpit audio system.

**Keywords:** cockpit speaker; squeal; acoustic feedback inhibition; audio system

\* Corresponding author. E-mail: chenze@comac.cc