

# 民用飞机声振耦合特性分析与控制

## Study on Vibro-acoustic Coupling Characteristic for Civil Aircraft

扈西枝 / Hu Xizhi

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

### 摘要:

舒适性是评价民机性能的一项重要指标,民机噪声与振动直接影响到飞机的舒适性。基于控制民机舱内噪声的目的,通过对民机舱内声振耦合特性的分析,提出了控制民机舱内结构声的思路和设计方案,以期为提高民机的舒适性提供技术支持。

**关键词:**民机;噪声与振动;耦合;控制

**中图分类号:** TB535

**文献标识码:** A

[Abstract] Civil aircraft noise and vibration directly affect the comfort of aircrafts, which is an important indicator for evaluating the performance of civil aircraft. Based on controlling of aircraft cabin noise purposes, this paper provided ideas and design method for controlling the aircraft cabin structure sound by analyzing civil aircraft cabin vibro-acoustic coupling characteristic, in order to provide technical support for improving the comfort of civil aircraft.

[Key words] Civil Aircraft; Noise and Vibration; Coupling; Control

## 0 引言

长期以来,飞机噪声一直是困扰世界航空设计、制造业的一大难题。对民用飞机而言,强噪声、振动的座舱环境不仅影响旅客、乘务人员的情绪,也影响电子设备、仪表的正常工作,甚至引起飞机结构本身的声疲劳乃至损坏,使飞行安全性受到威胁。国际上有些机型因噪声严重超标而被迫退出航线。同时随着公众健康保护意识的增强,民众对客舱的舒适度愈发关注,使得客舱环境的噪声与振动问题尤为明显。世界各国航空设计、生产公司均加大了研究噪声与振动的力度,以便最大程度地提高客舱的舒适性,增加所产民机的实力。

由发动机安装不平衡通过吊挂向舱内传播的振动及机身表面气动引发的向舱内传播的振动,虽然不是舱内主要噪声和振动来源,但它很难消除,对飞机的舒适性会产生一定的影响,国内外相关人士很注重这方面的研究。国产民机存在舱内噪声问题,且相较于同类型民机,该问题或许更严重一些。要保证国产民机在国际上的竞争力,必须对引起舱内噪声问题的各种因素进行研究治理,保证舱

内的声学环境,为乘客提供一个舒适的客舱环境。

## 1 舱内噪声源

影响民机客舱内声学环境的噪声源主要有两大类:外部噪声源及内部噪声源<sup>[1]</sup>。其中,外部噪声源主要包括:发动机噪声、机体噪声、发动机振动引起的振动辐射噪声,如图1所示;内部噪声源主要包括:环控系统(ECS)、辅助动力装置(APU)、液压系统等产生的噪声。

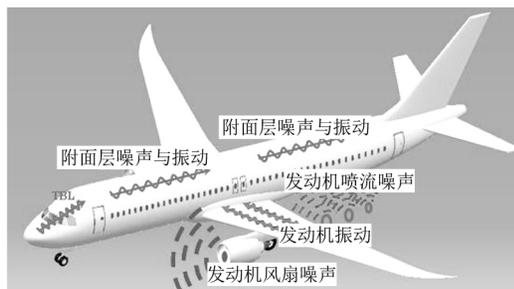


图1 外部噪声源

对飞机结构而言,在舱内传播的噪声按传声媒质的特征来分,可以分为空气声和结构声。空气声是指直接由发动机噪声及机体附面层噪声通过机

身侧壁透射而传播到座舱的声波。结构声指由包括发动机和机体气动力及飞机内部振源在内的各种声源、振源激起的机体结构振动在固体中传播而辐射到座舱内的声波<sup>[2]</sup>。

研究表明:空气声和结构声是分不开的,两者互相影响,结构声比空气声难治理,且二者的治理方案不同。因此,识别飞机客舱内的空气声、结构声及相互耦合作用,清楚舱内噪声主要来自哪种声源或振源,是进行民航噪声分析及控制的前提,对下一步的降噪工作十分必要。

## 2 声振耦合理论分析

振动引起噪声,但并不是相同的振动都产生同样的噪声,还与系统的声学特性密切相关。机身受到外界激励后引起机身壁板振动,同时机身壁板的振动又要受到客舱封闭空间内空气的制约,板壁振动后产生的噪声,经过客舱内空腔放大或衰减,反过来又可以放大或抑制机身板壁的振动,外界的力输入后经过这样的耦合后传到客舱<sup>[3]</sup>,才形成最终的客舱噪声。

只考虑机身结构本身的振动或只考虑客舱的声学空腔都不能反映“振动与声”耦合特性,而必须将飞机机身结构振动和客舱空腔的噪声耦合起来考虑。对于不同的结构,声与振动耦合的响应并不一样<sup>[4]</sup>。

### 2.1 飞机客舱空腔声学特性分析

研究飞机客舱空腔的声学特性时,可把三维分析问题简化为二维分析问题,所产生的误差不大。在二维平面内将客舱空腔离散化,则空腔系统的运动方程为:

$$G \ddot{P} + WP = F_s \quad (1)$$

式中: $G$ 为空腔的质量矩阵; $W$ 为空腔的刚度矩阵; $P$ 为节点扰动压力; $F_s$ 为外载荷;

$$G = \frac{1}{\rho a^2} \int_v N^T N dV \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{\rho} \int_v \nabla N^T \cdot \nabla N dV \quad (3)$$

$$F_s = -\int_{B_w} N^T \ddot{U}_n ds = -A \ddot{U} \quad (4)$$

其中:

$$A = \int_{B_w} N^T \cdot n^T \cdot H ds \quad (5)$$

式中: $H$ 为结构单元的形函数; $n$ 为耦合面法向量;

此时式(1)可写成:

$$G \ddot{p} = Wp + A \ddot{U} = 0 \quad (6)$$

### 2.2 机身结构振动与客舱内噪声藕合

对机身结构振动与舱内噪声藕合进行有限元

分析。在结构与声相互作用时,壁板对空腔压力做出反应,此时结构动力学方程为:

$$M \ddot{U} + KU + AP = F \quad (7)$$

式中: $M$ 为结构的质量矩阵; $K$ 为结构的刚度矩阵; $AP$ 为空腔内部空气对结构作用的声载荷; $F$ 为结构所受的其它外载荷。

组合式(6)和式(7),可得到常见的声振耦合方程:

$$\begin{bmatrix} G & A \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{P} \\ \ddot{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W & 0 \\ -A^T & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix} \quad (8)$$

如考虑阻尼,则式(7)可写成:

$$M \ddot{u} + C \dot{U} + Ku + AP = F \quad (9)$$

此时耦合方程可写成:

$$\begin{bmatrix} G & A \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{P} \\ \ddot{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W & 0 \\ -A^T & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 2.3 求解声振耦合方程

对于声振耦合方程的求解,有两种方法可选择:一是对式(10)直接求解,二是把式(10)对称化后再求解。

直接求解时,此时方程为:

$$M_c \begin{bmatrix} \ddot{P} \\ \ddot{U} \end{bmatrix} + c_c \begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{U} \end{bmatrix} + K_c \begin{bmatrix} P \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中: } M_c = \begin{bmatrix} G & A \\ 0 & M \end{bmatrix}, C_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix}, K_c = \begin{bmatrix} W & 0 \\ -A^T & K \end{bmatrix}$$

$M_c$ 为耦合方程的质量矩阵; $c_c$ 为耦合方程的阻尼矩阵; $K_c$ 为耦合方程的刚度矩阵。

对耦合方程进行对称化后求解时,从方程变换上讲,就是将方程(6)和(9)经变换后重新组合,得到一组新的运动方程,总质量矩阵和刚度矩阵是对称的。

现以 $M$ 为逆为例,将方程(6)和(9)经变换组合后得到耦合方程:

$$\begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{P} \\ \ddot{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -AM^{-1}C \\ 0 & K^T M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W + AM^{-1}A^T & -AM^{-1}K \\ -A^T & KM^{-1}K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -AM^{-1}F_1 \\ M^{-1}F_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

此方程还可写成:

$$M_{cs} \begin{bmatrix} \ddot{P} \\ \ddot{U} \end{bmatrix} + c_{cs} \begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{U} \end{bmatrix} + K_{cs} \begin{bmatrix} P \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

此时的阻尼值 $c_{cs}$ 仍然不对称,需进一步简化,令

$$c_{cs} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K^T M^{-1} C \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(11)和式(13)便可求解瞬态的响应及频率响应,解决由结构外载荷输入引起的声腔内某点的声压响应。

### 2.4 声振耦合仿真计算

由于声振耦合问题在许多工程中存在,需要解决的问题很多,因此在理论分析的基础上发展了声振耦合的仿真计算软件,可简便快捷的进行声振耦合的数值计算。

## 3 声振耦合的试验研究

利用试验方法进行声振耦合的研究,是最直接、可信用度的一种研究方法,原理如下:试验选取一机身段为声学试验平台,在舱外采用激振器进行激励,机身舱段内布置传声器进行声压级测量,以进行声振耦合的试验研究,试验研究的图片如图2、图3所示。



图2 外部激励

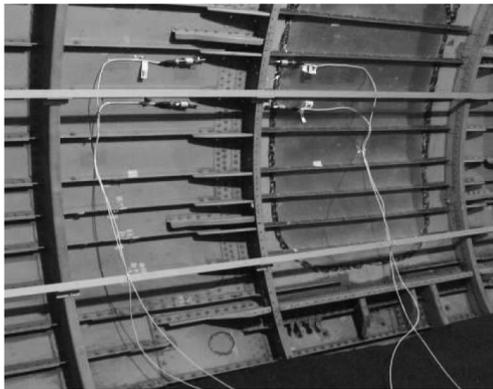


图3 内部测量

声振耦合试验研究方法不只这一种,根据结构形式的不同,可有不同的方法,本文所提方法只是针对民机客舱进行的一项试验研究。

## 4 客舱声振耦合控制的一般设计规则

从控制舱内噪声的角度讲,不同机型,不同的

系统和设备,舱内声与振动的来源和大小也不同,声振耦合的特性也不同,必须针对具体的型号进行测试、研究。要保证客舱的舒适性,空气声和结构声二者都要控制,且二者的控制方法完全不同。

由于结构声是由振动引起的,因此应该控制引起机身振动的振源大小,在无法控制振源大小的情况下,可以从振动的传递路径上消除机身结构的振动,控制过程非常复杂。下面是飞机设计中针对控制舱内声学环境的一些设计规范:

### (1) 动力装置

对飞机动力装置而言,不仅要限制其产生的噪声,还应采取减振安装设计,其中包括采用减振支架或减振支架加隔振器安装的设计方式,以减少振动及声振耦合的发生,提高客舱的舒适性。

### (2) 结构设计

结构设计主要指壁板的设计,设计时在保证结构强度、重量等各种结构设计要求的前提下,通过采用增加壁板的厚度、刚度、阻尼附加设计、装饰板与壁板连接采用减振连接等设计技术,控制结构产生的振动及由声振耦合引发的向客舱内传播的噪声,保证客舱的舒适性。

### (3) 设备、系统

控制设备、系统声振耦合现象的发生,主要是控制设备、系统局部安装部位的振动,可采用下列措施:

- 1) 对设备、系统附加减振器或对安装部位进行阻尼减振处理;
- 2) 调整振源与设备的相对位置。

## 5 结论

声振耦合现象对飞机舱内声学环境的影响不容忽视,通过研究,可以清楚空气声和结构声及声振耦合的形成机理,找出控制的方法,提高飞机客舱的舒适性。

### 参考文献:

- [1] 扈西枝. 民机舱内噪声源及其特性分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2010, 2: 10-11.
- [2] 姚起杭. 飞机噪声工程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 161-169.
- [3] M. P. Norton. Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers[M]. Cambridge University Press, 1989.
- [4] Anders C. Nilsson and Bilong Liu. Vibro - Acoustic (Volume I) [M]. Science Press, 2012.
- [5] 曹友强, 邓兆祥, 李昌敏. 车内耦合声场振动噪声预测研究[J]. 汽车工程, 2008, 6: 483-487.