

解决壳体/衬层脱粘问题十分有效。特性参数法和扫频超声法是为了检测深层界面的粘结质量而随后发展起来的。穿透法和声聚焦法都要使用低频超声换能器,以使声波能在推进剂内部传播一定距离。美国空军基地把特性参数法用于响尾蛇、麻雀等导弹的无损检测中,日本宇航局曾使用扫频超声法检测过 H-I 型和 H-II 型火箭发动机的粘接状况。

检测方法以外,还有许多其它配合工作,如声信号发射接收电路、机械装置、信号处理等。这里未作详细介绍。

### 参 考 文 献

[1] Harris-Maddox B, *Materials Evaluation*, Feb. 1966, 101—104  
[2] Zwijnenburg A, Korting PAOG, Reitsma H J, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1983, Vol. 8:40—45  
[3] Rogovsky A J, *Materials Evaluation*, Apr. 1985, Vol. 43:547—555

[4] Collins HD, Spalek J, 1st International Symposium on Ultrasonic Materials Characteristics, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, June 7—9, 1978, and 12th International Symposium on NDE, San Antonio, TX, Apr. 1979  
[5] 李明轩, 声阻法检测原理, 第一版: 北京: 科学出版社, 1976  
[6] Brekhovskikh L M, *Waves in Layered Media*, academic Press, 1960  
[7] Hueter T F, Bolt R, *Sonics*, Wiley Book Company, 1955  
[8] Bramanti M, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Aug. 1992, 41(4):490—494  
[9] Shimizu M et al, AIAA/ASME/SAE/ASEE, 24th Joint Propulsion Conference, Boston, Mass, July 1988  
[10] 田志海译, 固体火箭技术, 1991 年 6 月第 2 期: 64—70  
[11] Amaral J M, Lamb B L, NASA-CR-72840, Mar.-1971  
[12] Stinebring RC, Harrison RH, *Materials Evaluation*, Jan. 1965, 17—23  
[13] Collins H D, Proc. 10th Symposium on NDE, San Antonio, Apr. 23—25, 1975  
[14] Burckhardt C B, Hoffmann H, Grandchamp P A, *J. Acous. soc. Am.*, 1973, 54(6):1628—1630

# 时间-频率分析在声学中的主要应用

徐泾平 吴延军 程敬之

(西安交通大学生物医学工程与仪器系, 西安 710049)

1994 年 10 月 20 日收到

**摘要** 时频分析已在信号分析、建模、合成、重构、滤波、压缩编码以及信号检测与参数估计、模式识别等得到了广泛应用。本文在简要介绍时-频分布的有关内容之后,综述了该方法在声学(如生理声学、医学超声学、水声学、语音声学等)中的主要应用及研究进展。

**关键词** 时频分析, 声学, 非平稳信号分析

## Time-Frequency analysis and it's principal applications in acoustics

Xu Jingping, Wu Yanjun, Cheng Jingzhi

(Dept. of Biomedical Engineering and instrumentation, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

**Abstract** The time-frequency analysis has been widely used for signal analysis,

modelling, synthesis, reconstruction, time-varying filtering, compression, coding, signal detection, parameter estimation and pattern recognition, etc. After the simple introduction about the time-frequency analysis, this paper reviews the principal applications and researching advances of time-frequency analysis in acoustics. (eg. Bioacoustics, Medical Ultrasonics, Underwater Acoustics, Acoustic Phonetics, etc.)

**Key words** Time-frequency Analysis, Acoustics, Non-stationary analysis

## 1 引言

信号分析的基本域是时间域和频率域,这两个域之间通过信号的傅氏变换建立起联系。通常,频谱分析或功率谱估计方法是揭示信号频率结构的重要的、有效的方法。但是,对于非平稳信号或时变信号(或系统),由于不同时刻有不同的频率成份,仅单纯在时域或频域都不足以表示信号特征。为了有效地表示非平稳信号,近几十年来,人们致力于探索一种表示信号时-频结构的新方法,其中,最早的是语音信号处理中的谱图方法(或短时傅氏变换)<sup>[1]</sup>,这种方法是建立在信号具有短时平稳假设的基础上,因此,其频率分辨率与时间分辨率之间存在着矛盾<sup>[2]</sup>。

Wigner 于 1932 年提出一种时频联合分布的概念,1948 年, J. Ville 将它应用于信号分析,由于 Wigner 分布是一种时-频联合的信号表示,并且具有许多优良的性质,因此,近年来受到信号处理界的广泛重视<sup>[3]</sup>。联合时-频分布已在声学中有广泛的应用,本文简要介绍联合时-频分析在声学中几个重要方面的典型应用。

## 2 联合时-频分析简介

从信号处理的观点来看,时-频分布就是将一维时域信号  $x(t)$  映射到由时间和频率组成的时-频联合域上的一种信号表示方法,它是在时-频联合域中表征非平稳信号的时变特征,如图 1 所示为鸟声的时域波形、功率谱及时-频分布,从图中可见,功率谱仅给出了信号的频率成

份及其相对能量分布,并不能说明这个频率成份是什么时候产生的,而时-频分析却清楚地表征了信号频率成份随时间的变化过程。这清楚地说明了时-频分布与一般的功率谱的差异及时-频分析在表征非平稳信号或时变信号方面的优越性。有关时-频分析的特点及其优点可见参考文献[2,3],在这两篇文章中,作者们给出了更详尽的说明。

Wigner 分布具有高的时频分辨率,以及许多优良的性质,如:对称性,时移性,频移性,可逆性等。由于 Wigner 分布是信号的双线性泛函,因此,这种分布对多分量信号会产生严重的交叉项(或干扰),且不能保证非负性。这两个现象使得 Wigner 分布很难解释为时间-频率平面上的能量分布。

Cohen 类时频分布统一了几十种性能各不相同的二次型时频分布<sup>[2]</sup>,这使得人们可用统一的数学表达式来研究形式上差异很大的许多时频分布。同时,人们也发现核函数是决定和控制分布性质的最重要因素,不同的分布具有不同的核函数、通过设计核函数,人们可以获得交叉项小的许多新型分布,如平滑伪 Wigner 分布,Choi-Williams 分布(CWD),减小交叉干扰的分布(RID),锥型核分布(CKD)<sup>[3]</sup>,Bernel 核分布(BD)<sup>[4]</sup>和复合型核分布(CD)<sup>[5]</sup>等。

核函数可依赖于时间、频率和信号,近年来,由于双线性分布(或二次型分布)的许多适用于信号处理的优良性质,其研究受到广泛重视。但固定核的分布仅对有限类信号提供了正确的时-频表示,因此,依赖于信号的时-频表示

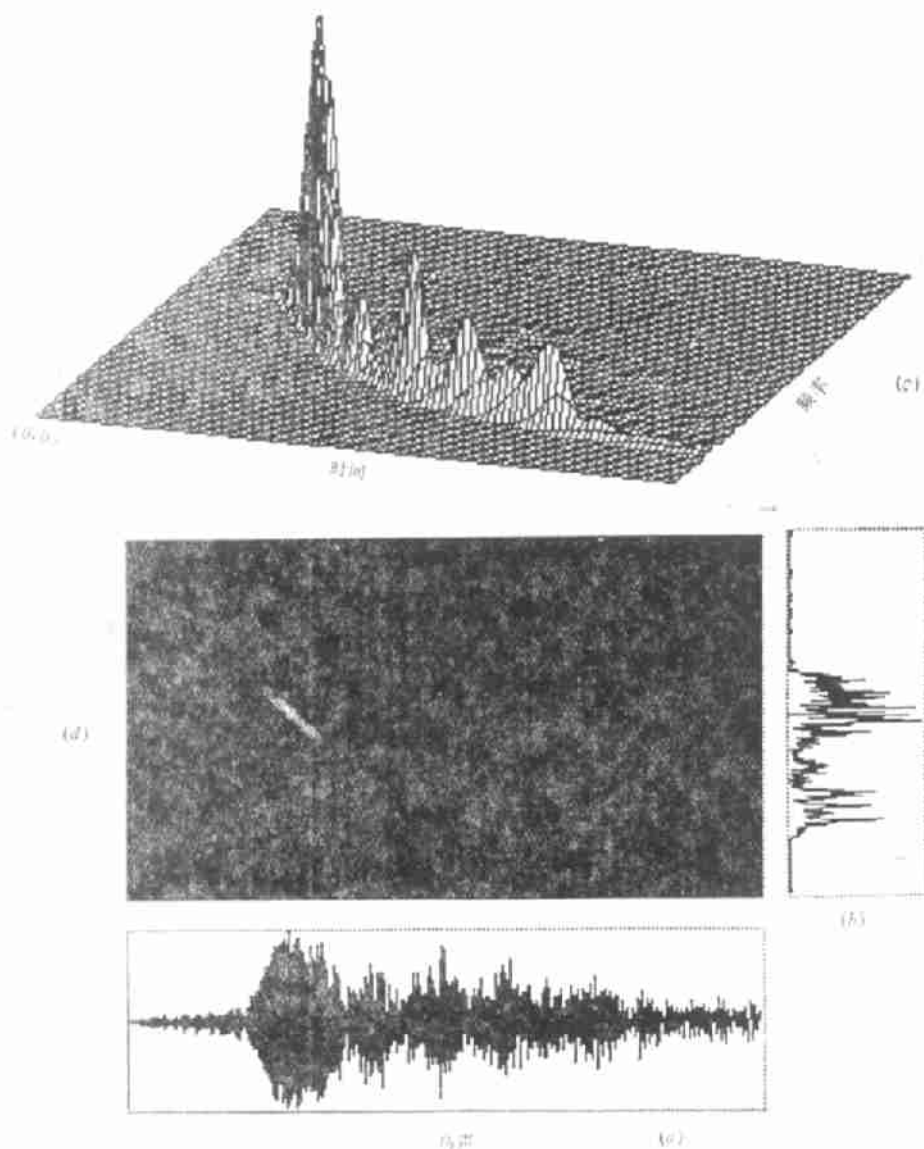


图1 鸟声的时域波形(a)、功率谱(b)和时-频分布(c,d)

逐渐受到重视<sup>[5]</sup>。

### 3 在声学中的几种应用

联合时-频分析已在信号处理的许多领域中得到广泛应用,如:非平稳信号或时变系统的分析、建模、合成、重构、滤波、压缩编码以及信号检测和参数估计,模式识别等,在声学中也有广泛的应用,下面就联合时-频分析在扬声器、医学超声学、肌音分析、心音分析、语音信号分析、水声学中的应用作简单介绍。

#### 3.1 扬声器中的应用

扬声器是一种电声换能器,它是声学领域中使用最广泛的声学器件。目前,测试扬声器的指标有功率、频响曲线、特性灵敏度、阻抗、谐波失真以及最近提出的群延迟特性,前沿累积频谱,后沿累积频谱,累积 $2\pi$ 指向频谱特性曲线等。Janse和Kaizer将Wigner分布引入扬声器设计领域,已取得了有意义的结果,这种方法可表示扬声器系统的时-频特征,分辨出扬声器各单元工作状态的细微变化信息<sup>[6]</sup>。Verschuur

等人也进行了这方面的研究工作<sup>[8]</sup>。Preis 等人将 Wigner 分布也应用于相位失真问题的研究,根据其研究成果建议 Wigner 分布及其它改进型分布可作为分析各种音频工程中相位失真问题的方法<sup>[9,10]</sup>。

3.2 在医学超声学中的应用

医用换能器是医学超声仪器的重要部件,设计好一个超声探头后,如何评价它的性能是一个重要问题。传统的方法是频谱分析方法和扫频测量方法来测量换能器的频率特性。Marinovic 等人采用对超声探头的冲激响应作 Wigner-Ville 分布的方法来表征超声换能器的特性,全面描述了换能器的特性。应用这种方法的最大优点是人们能快速地看到改变有关参数对换能器性能的影响,详细情况请参考文献[11]。

用超声多普勒技术探查血管中血流流速是目前临床广泛应用的技术。血液中血细胞是随机分布的,因此,在一个心动周期中血流速度是随时间变化的,是一种非平稳性较强的随机信号。为了从超声多普勒血流信号中提取信息,目前,国内外已广泛应用动态功率谱技术作为临床诊断方法。但是,这种动态功率谱的主要缺点是不可能同时获得很好的时-频分辨率。文献[12]提出应用三种时-频分析方法(Choi-Williams 分布,减小交叉干扰分布和作者们的 Bessel 分布)于模拟的超声多普勒血流信号分析。在计算信号的时-频分布时,通常大都采用解析信号以避免混叠(aliasing),但是,多普勒血流信号中蕴含着血流速度方向信息,是一种复信号,因此,该文献中采用了 Jeong 和 William 提出的一种新的无混叠广义离散时间时-频分布方法(AFGDTFD),这种 AFGDTFD 以  $2\pi$  为周期。研究表明在上述分布中, Bessel 分布最适用于多普勒血流信号分析; Choi-Williams 分布和 AR 建模也提供了多普勒血流信号好的时-频分布。

3.3 在肌音分析中的应用

肌肉收缩时所产生的声音可作为肌肉力产生、疲劳(乏)及肌肉收缩等的分析指标,而且这应用声学

些声信号对儿童的神经肌肉疾病诊断具有潜在价值,同时,这些声信号也可应用于运动医学来评价运动员的肌肉疲劳程度等。

一般文献中大都采用功率谱分析方法来分析这些声信号的特征,可提取肌肉的共振频率,但是,由于肌肉收缩过程是一个瞬态过程,共振频率与哪些因素有关,它是怎样变化的,这是人们十分感兴趣的课题。Barry 等人<sup>[13]</sup>应用联合时-频分布于肌音分析,他们采用加速度计来检测信号,由电荷放大器放大后,带通滤波,采样得到数字信号,用 Wigner 分布和 Choi-Williams 分布来计算这些非平稳肌音信号的时-频分布,从中估计出瞬时频率。实验结果表明:峰值瞬时频率发生在肌肉的瞬时共振频率点上。当弄清声信号特征与肌肉性质之间的相关性后,肌音分析将提供一种无损伤的诊断方法,并具有潜在的诊断价值。

3.4 在心音信号分析中的应用

心音是心脏及大血管机械运动状况的反映,当心血管疾病尚未发展到足以产生其它症状之前,心音中的杂音和畸变是唯一的诊断信息,它是医生评估心脏功能状态的最基本的方法之一。由于心脏搏动过程是一个动态过程,因此,要获得心脏的动力学特征,就需要研究心音信号频率成份随时间的变化。Wood 等人<sup>[14]</sup>将时-频变换引入第一心音分析中,并应用了一种新的分析工具——二项式联合时-频变换,其目的是验证第一心音频率在等容积收缩期期间将升高这一假设。在 8 只开胸狗的左心室外壁上直接粘附极轻的加速度计来检测心音信号,结果表明:在 R 波后 30—50ms,有一个由 40Hz 迅速增加到 140Hz 的频率成份。在等容积收缩过程中期开始有一个频率为 60—100Hz 的慢变化分量。这种时频分析方法与谱图相比,可获得更高的分辨率。通过再现第一心音的开始和动态变化,时-频变换可对人体心脏结构进行力学评价,也有利于揭示心音的发生机理和提高活体心音分析的诊断灵敏度。文献[12]也研究了心音信号的时-频分布,他们认为:由于 Choi-Williams 分布不满足时间和频率支持性

质,应用 CWD 于心音信号分析时,CWD 不能给出正确的估计,而作者们提出的 Bessel 核分布能给出好的时-频特征。

### 3.5 在语音信号分析中的应用

语音是人类进行信息交换最自然和最基本的方式,它也是人与机器之间信息交换的最理想的手段。信号中携带着讲话者的重要信息,如何从语音信号中提取有关信息一直是人们十分关注的重要课题。很早人们就知道语音信号是一高度非平稳信号,自 1946 年发明语谱图以来,它作为语音信号动态频谱的表示方法已被广泛应用,但是,由于时间和频率分辨率之间的矛盾,为了从语音信号中获得更多的信息,人们不得不采用宽带语谱图和窄带语谱图两种谱图来分别观察语音信号频谱中快速变化过程和较细致的频谱特征。联合时-频分布则在一定程度上解决了不可能同时获得较好的时间与频率分辨率这一矛盾,因而近年来在语音处理中受到人们的广泛重视。

语音信号分析遇到的基本问题是分辨出靠得很近的两个共振峰、跟踪快速变化的功率谱峰,以及对于短的辅音获得较好的功率谱。许多文献的实验表明:联合时-频分析是解决这些问题的一个更有效的方法,它比传统的谱图方法具有更高的时-频分辨率,既能分辨出靠得很近的两个共振峰,同时也能跟踪功率谱变化的细节(见图 2 所示)。

尽管联合时-频分布适用于语音信号分析,但是,在使用上,还存在一些问题,有的是由于分布本身固有的限制而产生的,如存在交叉项引起的共振峰模糊问题,有的则由于负值使得结果难于解释(实际上为了显示方便,常使负值部分取为零),另外,选用什么类型的核函数比较好,目前尚无定论。

### 3.6 在水声学中的应用

水声学是研究声在海洋中的传播与应用,一是声在海洋中的传播规律,其中包括由于波浪、内波、气泡和微观不均匀引起的声散射,传播衰减和信号起伏,及信号的多径传播和频散引起的畸变,海中的散射场、混响场、目标反射

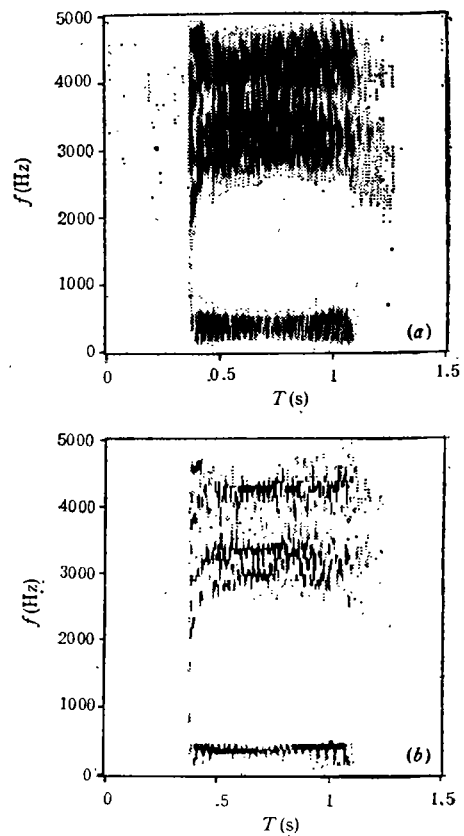


图 2 一个女性讲话者发音“bee”时的宽带语谱图(a)和锥型核的时-频表示(b)。

图 2(b) 清晰地分辨出第一共振峰 ( $F_1 \approx 3000\text{Hz}$ ) 和第二共振峰 ( $F_2 \approx 3300\text{Hz}$ ), 并清楚地显示出从 /b/ 到 /i/ 的动态变化过程。

的谱结构,海洋噪声及产生机制等方面的研究。另一方面是水声学中的逆问题或称为声遥感。水声学中涉及到信号处理的问题很多,详细情况可参考文献[15]。在这里,就联合时-频分布在水声信号处理中的应用作一简单介绍。

在被动声呐(也称无源声呐)中,利用被检测目标本身辐射出来的某种特定声信号来检测目标,解决这个问题常用到经典的统计检测理论,如匹配滤波。这个问题也可用基于联合时-频分布的检测方法来解决,已有几位作者提出了基于时-频分布的检测方法和估计方法<sup>[16]</sup>,如谱相关器已用于对某些时变信号分析。Gabor 表示已用于检测未知波形的变化和到达时间。利用联合时-频分布作检测的原因之一是时域相关和两个信号互 Wigner-Ville 分布(XWVD)

相关之间的等价性,许多经典检测问题的时域相关可由等价的 XWVD 相关来代替,这个代替的优点是利用时变滤波可有效地分离提取信号的时-频特征,并减少噪声,从而很容易地提高信噪比,这种方法特别适用于信号波形未知的情况,而匹配滤波器不可能实现上述功能。

在主动声纳中,由系统本身辐射某些给定形式的声波,并检测被检目标的回声,良好的发射波形设计和接收机的信号处理技术是两个基本因素。波形设计通常由模糊度函数来实现,但信号的 WVD 与它的模糊度函数之间为傅氏变换关系,而且 WVD 为实数,也可以利用 WVD 来实现波形设计。Flandrin 等人<sup>[17]</sup>应用联合时-频分布于蝙蝠声纳回波定位系统,分析了各种声纳信号的时-频特征。在水中声波的频散问题也可利用时-频分布来研究,并且这种方法比单独的时域或频域分析技术有其独特的优点<sup>[2]</sup>。

## 4 结束语

很久以来,信号处理专家们一直企图建立一种与平稳随机信号理论平行的适用于非平稳随机信号处理的理论,这种理论不是平稳随机信号理论的简单推广,而是一种在本质上不同于平稳信号理论的一种全新的概念和方法。经过近 40 多年的努力,已取得了许多成果,而近年来更有较大的发展。在声学中,它的应用是多方面的,除以上介绍的 6 个方面之外,广义时-频分析潜在的应用领域主要有: 高分辨率时变谱估计,时变信号的滤波与检测、信号和目标的分类与识别,时变信道的特性分析以及运动目标的高精度参数估计等。另外,还有机械噪声分析与机械故障诊断、振动分析、地声信号处理、生物声学等方面。近年来, Wigner-Ville 分布在线性扫频测量 (*Linearly Swept Frequency Measurement*) 中也有广泛的应用<sup>[18]</sup>。声场匹配技术与目标被动定位是十分重要的研究课题,空间 Wigner 分布或空间-波数分布 (*Space-Wavenumber Distributions*) 已开始应用于近场特性的分析,这方面的研究在

应用声学

学术上和應用上都有重大价值<sup>[18]</sup>。

从整体来看,联合时-频分析大致上有三个方面的应用<sup>[2]</sup>,第一利用联合时-频分布作信号的动态频谱分析,看它是否比传统谱图揭示出更多的信息。第二是基于联合时-频分布特征量与物理量之间的相关性,从时-频分布间接地计算出描述物理过程的各种物理参数,如由瞬时频率对介质中衰减和散射系数的计算, Boashash 等人<sup>[19]</sup>在地球物理勘探中提出了这一方法,这一方法同样也适用于其它声学问题,如声学中的许多频散问题。第三是利用分布作为一种携带信号中信息的载体,而不关心分布是否真正地表示能量密度,这样可实现信号重构压缩编码及模式识别。尽管目前已取得了很大的成果,但是,还远没有实现专家们的愿望,还有许多重要课题有待于人们进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] Koenig R, Dunn H K, Lacy L T. *J. Acoust. Soc. Am.* 1946, **18**:19—49.
- [2] Cohen L. *IEEE proc.* 1989, **77** (7): 941—981.
- [3] Hlawatsch F, Boudreaux G F. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1992, **9**(2):21—67.
- [4] Zhengu G *et al.* *IEEE SP*, 1994, **42** (7):1700—1707.
- [5] Bilin Z, shunsuke S. *IEEE SP*, 1994, **42** (1): 54—64.
- [6] Baraniuk R G, *et al.* *IEEE SP*, 1994, **42** (1): 134—146.
- [7] Janse C P, Kaizar A J M. *JAES.*, 1983, **31**: 198—223.
- [8] Verschuur D T, *et al.* *JAES.*, 1988, **36**(4):203—211.
- [9] Preis D. *J. Audio Eng. Soc.*, 1982, **30**(11):774—794.
- [10] Preis D, Hlawatsch F. *JAES.*, 1987, **35** (12): 1004—1012.
- [11] Marinovic N V, Smith W A. *IEE Int. Symp. 1986 Circuits and Systems*: 50—54.
- [12] Zhengu G, *et al.* *IEEE BME*, 1994, **41**(4):332—342.
- [13] Barry D T, Neil M C. *IEEE BME*, 1989, **37**(5): 525—531.
- [14] Wood J C, *et al.* *IEEE BME*, 1992, **39** (7): 730—740.
- [15] 李启虎. *应用声学*, 1993, **12**(5): 1—6.
- [16] Boashash B, *et al.* *IEEE ASSP*, 1990, **38**(11): 1829—1841.
- [17] Flandrin P, *Animal sonar system symposium*.

(下转第 12 页)

这样设计的小孔消声器可获得 40dB 以上的噪声降低量。这就是小孔消声器的工作原理。

在设计小孔消声器时，一般都采用膨胀式小孔消声器，因为膨胀小孔消声器一则可因膨胀而使压力降低，小孔管的耐压要求便相应放宽，二来压力降低又带来噪声的进一步减弱，这部分一般有 5—15dB 的效果。

膨胀小孔消声器的结构概要如图 3 所示，孔管有两个，膨胀腔里边的大孔管上打直径较大例如 4—6mm 的大孔(也可打小孔)，外面膨胀腔即作小孔管用，其上打小孔。大孔的总面积  $S_1$  比膨胀腔的横断面积  $S_2$  小，小孔的总面积  $S_3$  也比  $S_2$  小。 $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  之间的关系由一维流理论求得，图 4，这是对七种不同的  $S_2/S_1$  计算得到的。由图可见， $S_2/S_1$  的影响不明显，这使设计很方便。有了这些面积关系，再选取大孔和小孔的直径，就可计算大孔数和小孔数。

让大孔控制流量，其有效面积  $S$  根据预先规定的流量(或复压时间)由式(2)算得。再从图 4 选取一对  $S/S_1$  和  $S_3/S_1$ ，即可求得  $S_1$  和  $S_3$ 。计算时还需作流量收缩效应的校正，小孔的收缩系数为 0.62，管的收缩系数为 0.92。

消声器设计计算

以前已算得如用直径 100mm 的连接管，复压时间约为 20s (图 2)，与预定的 90s 比短许多。为了获得尽可能好的消声效果，同时又保证复压时间小于预定值，现在取  $S$  为  $4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。从图 4 选  $S/S_1 = 0.9$  和  $S_3/S_1 = 1.2$ 。这样  $S_1$  为  $4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ， $S_3$  为  $5.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。膨胀腔的直径取为 200mm， $S_2$  即为  $3.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ，这样  $S_2/S_1 = 6.89$ 。

大孔的直径定为 6mm，需打 160 个孔，在标称直径 108mm 的管上每周打 20 个大孔，共

打 8 周。小孔直径定为 1mm，需打 6750 个孔，考虑到小孔的收缩效应，实际要打 10880 个孔。小孔之间的距离对消声器的性能有很大影响，距离太会使消声器的性能变坏，这里定为 8mm。膨胀腔上每周可打 78 个孔，共打 140 周，膨胀腔长 1120mm。小孔消声器应与四周的舱壁等障碍物保持尽可能远，例如 300mm 的距离，以免气流冲击障碍物产生新的噪声。

4 噪声级和复压时间的估计

小孔消声器能使噪声降低 27dB，大孔的控流作用可使噪声降低 3dB，膨胀引起的压力减小使噪声降低 5dB，因此理论上总的效果为 35dB，但大量的经验表明，这样的消声器实际可使噪声降低 40dB 以上。另一方面，试验舱是一个体积有限的封闭空间，混响的作用可使舱内的噪声提高 3dB。结果，根据图 2，在复压开始约 5s 后，舱中的噪声级即可降到 100dB 以下。安装消声器后，舱内压力恢复到  $10^5 \text{ Pa}$  的时间约为 40s。

噪声控制必需照顾到控制措施的降噪效果和为此而付出的经济代价，一项合理的噪声控制设计要在二者之间作妥协。若想进一步降低噪声，原则上只需再将小孔的孔径减小，例如用 0.5mm 的孔径，噪声还会降低 10dB 以上，可是这就不经济了。

参 考 文 献

[1] Daneshyar H, Isentropic Flow, Oxford (England), PERGAMON PRESS, 1971: 26

[2] 马大猷, 李沛滋, 戴根华, 王宏玉. 中国科学, 1977, (5): 23

[3] Li Peizi, Dai Genhua. Journal of Occupational Safety and Ergonomics 1995, 1(1): 52—63.

[18] Boashash B, Ed. Time-frequency signal analysis-methods and applications, Melbourne, Australia, Longman cheshire, Wiley, 1992.

[19] Boashash B. Time-frequency signal analysis, in Advances in spectrum Analysis and Array processing. Vol. 1, S. Haykin, Ed. Englewood cliffs. NJ; prentice-Hall, 1990.

(上接第 43 页)

Hélsinger (DK), Sept: 1986 10—19.