

高声强实验室的设计和应用

沈 濂 陈定楚

(中国科学院声学研究所)

1982年3月1日收到

本文讨论中国科学院声学研究所高声强实验室的设计和应用。介绍所获得的 150—160dB 混响场和 168—174dB 行波场的特性。在设计和建造过程中,我们解决了一些问题。例如,小混响室的体积、总声压级和声场均匀度的选择,输出声功率达 1,500W 和 10,000W 的气流扬声器的研制,气流扬声器与混响室的耦合,消声管道的设计和安装等。

一、 引 言

高声强实验研究是随着火箭、导弹及各类飞行器的发展而开展的。弹道导弹的弹头在发射和再入大气层时都要经受高强度的噪声环境,噪声超过 160dB。这样高的噪声级可能引起结构的疲劳和电子设备的失效。因此,正确估计导弹将遇到的噪声环境,在设计中考虑它的作用,用模拟的噪声环境,对产品进行声疲劳试验,是检查设计质量和保证安全运行的重要措施。在航空工业上,由于喷气飞机的出现,飞行速度的增大,伴随而来的噪声功率也相应增高。测量结果表明,一般喷气飞机的噪声级在 145—155dB 范围内。虽然噪声级比火箭噪声级要低,但它经受噪声环境的时间比火箭长得多。因此,保证飞机安全和合理的设计,对飞机的整体和部件作噪声环境加速试验也是十分必要的。

除了上述金属结构的声致疲劳以外,在 140dB 以上的噪声环境下,无线电元件和精密仪表可能失效而影响遥测、遥控。高强度噪声对发射场、飞机场附近的建筑物,由于轰声也会激发振动的破坏效应。对人的影响,除了听觉器官以外,还可能诱发一些疾病,如头痛、精神衰弱、消化不良等,严重的尚能导致心血管系统疾病。此外,高强度噪声场使声波传播、材料的吸声特

性,都不能再用线性声学来处理。

根据国防工业和高声强研究工作的需要,我所建立了高声强实验室,并且研制了大功率气流扬声器。在实验室中,用无规信号获得了高达 150—158dB 的混响场和 168—174dB 的行波场。建成后的高声强实验室,可以进行许多实验研究工作。例如,研制大功率噪声源、模拟强噪声环境、进行材料和结构的声疲劳试验,进行仪器和设备的失效试验,研究材料的吸声、隔声和消声特性,研究大振幅声波的传播,研究强噪声的生物效应等等。关于声疲劳的实验研究^[1]和其它一些研究结果将另文报道。

二、 高声强实验室简介

高声强实验室内主要设置行波管和混响室。行波管的声场是自由行波,混响室的声场是漫射波。它们的主要区别是空间相关性不同。行波管和混响室的选择依据是使用的声功率,所需要的声压级和频谱,试件大小等。行波管可以在较小截面内产生较高的声压级,基本不受频率的限制,特别是在管内容易产生低频声场,声场和频谱都比较均匀。在混响室内用较小的声功率可以在较大的体积中产生相当高的声压级,但在低频率声压级起伏比较大。对于大型试件,为了用有限的声功率获得高的声压级,还可以使用行波套管。

三、强噪声的产生

为获得高的声压级，大功率噪声源是关键。早期曾使用普通电动扬声器，但它的膜片前的声压级最高只能达到 130—140dB，除了小型混响室外不可能产生更高的声压级。噪声环境试验初期曾直接使用喷管和喷气发动机作噪声源，但设备昂贵，使用不便。国外在五十年

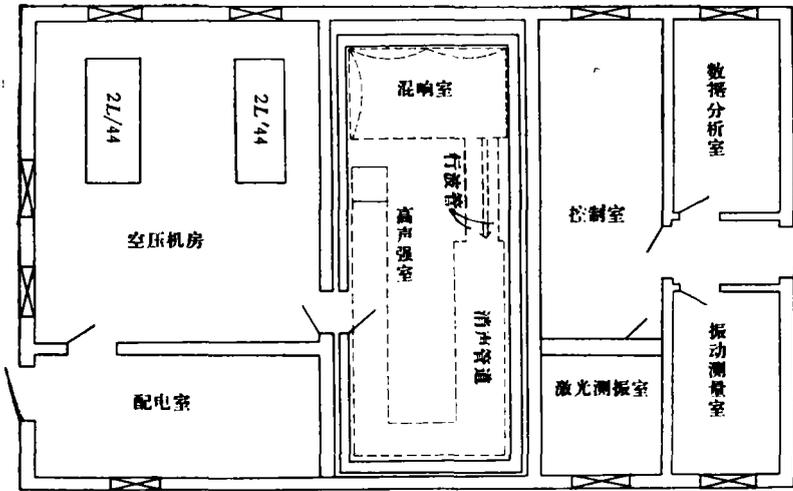


图1 高声强实验室平面图

图1是声学所高声强实验室的平面示意图。其中有混响室、行波管、空压机房和控制室。这个实验室对周围环境有良好的隔声和消声性能，以免实验时干扰附近单位正常工作。混响室和两套行波管埋在地下，获得了良好的隔声性能。为了降低混响室和行波管排气口产生的强噪声，建造了一个能降低约 100dB 声压级的消声管道，管道在地下部分长 10m，地上部分长 5m。

混响室的内部尺寸为 $4.0 \times 3.2 \times 2.67\text{m}$ ，用钢筋混凝土结构，最小厚度为 25cm。混响室内相邻垂直的三面作成互相垂直的圆柱状，高和弦长之比为 10:1。内壁五面采用水磨石，天花板用高标号水泥抹面，压光，干燥后上油漆三道。两套行波管用连接管与混响室排气孔相连。测试段长 2.2m，在出气端相连。行波管的公共壁为 40cm 钢筋混凝土，其它壁面为 25cm 钢筋混凝土，内壁贴有 1cm 厚表面磨光的大理石板。此外尚有一套直径为 14cm 的钢管做成的行波管，测试段长 40cm。

控制室内放置必需的测量仪器，除声学和振动测量仪器外，还装备了激光全息干涉测振装置，声发射仪和成套工业电视。空压机为两台 2L/44 型活塞式空气压缩机，它提供气流扬声器所需的压缩空气气源。

代开始使用正弦旋笛和无规旋笛作噪声源，它可以得到很高的声压级。宽带无规旋笛的缺点是所产生的只是近似宽带无规噪声，频谱中含有相当于转子速度的基频和倍频。即在连续谱中还有线谱。此外，旋笛输出的频谱是无法改变和控制的。六十年代，气流扬声器作环境试验的噪声源被广泛使用，它不但声功率大，频谱较宽，而且频谱形状也可以调节。因此我们在分析调制气流声源原理和推导出气流扬声器设计方法的基础上，研制了声功率为 1,500W 和 10,000W 气流扬声器用于高声强实验室。下面简单地给出一些声学特性，更详细的内容可以参考文献 [2-3]。我们研制了三种气流扬声器：1.5kW 单排缝气流扬声器，1.5kW 四排缝气流扬声器和 10kW 八排缝气流扬声器。表一给出所研制的和美国同类型的气流扬声器的主要技术特性。在比较上述数据时应注意，由于气流扬声器的测试方法尚未统一，因此有些数据，由于测试条件不同，不能直接比较，仅能作参考。

一般电动式气流扬声器有两个主要缺点，即频率范围窄和引出线的焊接工艺要求高，在使用中引出线容易折断。感应方式，不但可以展览气流扬声器的工作频率范围，而且省掉了振动的引线。美国为“阿波罗”登月舱进行噪声环境试验，研制了 10kW 感应式气流扬声器^[4]。

表 1 气流扬声器的主要特性

特性与参量	声 学 所			美 国	
	单 排 缝	四 排 缝	八 排 缝	二 排 缝	十 排 缝
气声特性					
1. 输出声功率, W(正弦) (无规)	1500	1500	10000	2000	10000
2. 工作气压, kg/cm ²	2	2	1.7	2.7	2.7
3. 流量, m ³ /min	10	12	40	8.5	44
4. 频率范围, Hz	125—800	125—1000	125—500	50—650	50—2500
5. 信噪比	40	30			
力学参数					
1. 动圈直径, mm	70	70	120	76	110
2. 调制缝面积, mm ²	7.5	12	24	5.5	24
3. 尺寸, cm	φ20×15	φ20×20	φ25×25		φ16×27
4. 重量, kg					15.9
5. 需要电功率, W	100	150	360	100	3600
	文献 [3]			文献 [9]	文献 [4]

由于实验室气源压力的限制, 气流扬声器没有运用在最佳工作压力状态。实验表明, 若把气压提高到 3—4kg/cm², 噪声场的声压级还可提高 3—4dB。

在高声强实验室中, 对强噪声源的要求是声功率大, 气声效率高, 声压级频率范围宽, 频谱形状可以调节, 并且具有和被模拟噪声环境类似的统计特性。但迄今还没有一种能够全面满足要求的大功率声源。因此只能根据实际需要采用折衷方法。对声功率的要求不是绝对的, 它和测试空间大小、模拟方法有关。此外, 对一些专用的高声强实验, 可以采用行波管、行波套管, 以降低对强噪声源的声功率要求。另一方面, 还可以用几个气流扬声器组合使用, 以增大声功率。

喇叭与混响室的耦合是一个必须考虑的问题。通常混响室使用的极限频率很低, 因此喇叭的截止频率也很低, 要求喇叭具有很大的开口, 实际中较难满足。但是耦合条件对气流扬声器声功率输出的影响很大。气流扬声器的开口面积太小, 会使它的输出声功率比用行波管时低很多。实验表明, 增大喇叭开口面积, 能显著地增加低频辐射功率。就总声压级来说, 同一气流扬声器的输出声功率大约可提高 4—5dB。

应用声学

四、行波管

行波管构造简单, 能得到较高的声压级。可以满足一般仪表、元件的噪声试验要求。在行波管内声强为:

$$I = W_A/S, \quad (1)$$

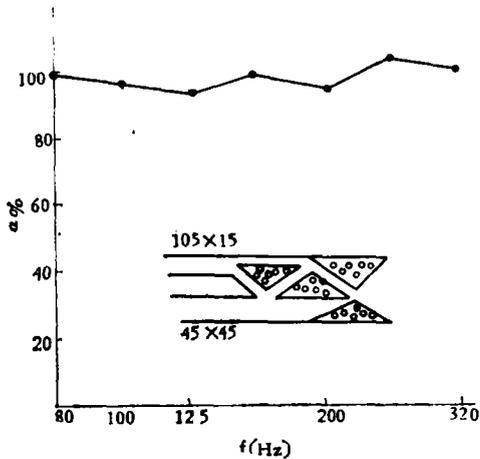
$$L_w = L_p + 10 \log S. \quad (2)$$

式中 W_A 为声源功率 (W); S 为管的截面积 (m²); L_w 为声功率级 (0dB=10⁻¹²W); $L_p = L_l$ (0dB=10⁻¹²W/m²)。

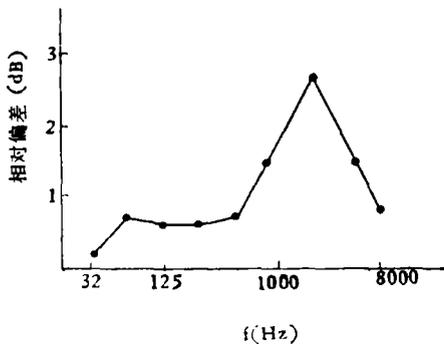
只要给出所需的声强级或声压级, 根据 S 值就可以计算出所需要的声功率。例如, 在直径为 φ14cm 行波管内获得 170dB 需要的声功率约为 1.5kW。

在设计和建造行波管时, 如何保持行波管内声场均匀, 低频端主要取决于终端的吸收。行波管的终端吸收要求全吸收 (吸收系数大于 95%) 才能保证管中是行波。否则会出现驻波而影响声场的均匀性。高声强实验室中设置 105 × 15cm 和 45 × 45cm 两套行波管, 终端采用泡沫塑料作成棱形来拼成吸收尖劈, 如图 2(a) 所示。它保证在 80Hz 以上吸声系数大于 95%。其次, 高频的干扰来自横向驻波。测量波长应为壁面间距的 1.7 倍以上, 才能保证平

• 19 •



(a) 行波管终端吸声系数



(b) 行波管声场分布的标准偏差

图2 行波管的声学特性

面波而不出现横向驻波。所以，在 $45 \times 45\text{cm}$ 的行波管中，测量频率应小于 450Hz 。图 2(b) 为行波管截面上选取 72 个点测量声场分布得出的标准偏差。可以看到 1000Hz 以上横向驻波的影响。但是，即使在 1000Hz 有横向驻波，偏差也在 3dB 以内。

五、混响室

混响室一般的特点和设计方法参看文献 [5]。噪声环境试验用混响室的主要特点是声压级高，低频的声场起伏大，由于使用气流扬声器必需有排气口，今分别讨论如下。

1. 混响时间

按照赛宾公式，混响室内混响时间为

$$T = 0.163V/A, \quad (3)$$

$$A = \alpha S_1 + 4mV + S_2. \quad (4)$$

式中 α 为混响室内部表面(不包括排气孔面积)的平均吸声系数， S_1 为混响室内部不包括排气口的面积， S_2 为排气口的面积， $4mV$ 是空气吸收。

$\alpha S_1 + 4mV$ 部分吸声在高声强下可能会有非线性效应， S_2 部分吸声较大则混响室的混响时间频率特性比较平直。混响室低频的混响时间不象一般混响室那样高，当填塞所有出气口，用电动扬声器测量混响时间时，低频上升就较快。此外，随着声压级升高，混响时间稍有下降的趋势。已建 27m^3 混响室的中频混响时间约为 4.5s 。

2. 总声压级

常用的混响室内总声压级的计算公式为

$$L_p = L_w - 10 \log \frac{V}{T} + 13.5, \quad (5)$$

$$\text{或 } L_p = L_w - 10 \log A + 5.5. \quad (6)$$

式中 V 为混响室容积 (m^3)， T 为混响时间 (s)， A 为混响室内总吸收量 (m^2)。

对一般水磨石结构的混响室，在具有合理的排气情况下，混响室内表面的平均吸声系数大约为 0.02 ，因此式 (6) 化为

$$L_p = L_w - 10 \log S + 22.5. \quad (7)$$

高声强混响室内总声压级是否能用上述公式直接计算？由于国内外许多混响室建成后的测量结果都比计算值低，因此有较多的讨论。有许多作者分别发表了经验公式。如文献 [6] 提出加 -8dB 的校准值，文献 [7] 提出加 -6dB 的校准值。资料 [8] 则假定 $\alpha = 0.015$ ，同时采用 -6dB 的校准值。

由式 (7) 看来，影响混响室内总声压级计算值的仅是 L_w 量。因此我们用数种声功率测量方法，比较了同一气流扬声器在同一工作条件下，在行波管内和混响室内辐射的声功率。我们的实验结果表明，在气流扬声器与混响室耦合比较理想的条件下，准确估计气流扬声器辐射的声功率，经典的赛宾公式是可以用来计算混响室内的总声压级的。当然，测量结果与计算值相差 1dB 左右是允许的。下面我们用一组测量数据来说明这种情况。

例如，在行波管内测得无规噪声功率为 1.5kW 的气流扬声器，以比较理想的匹配条件耦合到混响室，分别用测量混响时间方法和用标准声源比较法求得的声功率约为 $620\bar{W}$ ，代入式 (7) 可得

$$L_p = 10 \log \frac{620}{10^{-12}} - 10 \log 64.8 + 22.5 = 152.5$$

该气流扬声器用 $15 \times 15\text{cm}$ 喇叭耦合到 27m^3 混响室内，用无规信号测得的总声压级为 149dB，若用 $45 \times 45\text{cm}$ 喇叭耦合到混响室，则 $L_p = 153\text{dB}$ ，与上述计算结果相似。这里说明，气流扬声器使用于混响室时，与行波管情况相比，辐射的声功率大约要降低 4dB 左右。但是喇叭与混响室之间匹配的条件不同，大约会使辐射声功率相差 4—5dB。因此可以认为，英美各国提出，计算混响室总声压级采用 6—8dB 的校正量，可以解释为，由于气流扬声器与混响室在不同匹配条件下所引起的辐射声功率损失。在实际情况下，若气流扬声器辐射声功率采用行波管法测量的数值，考虑到上述情况，采用一个合理的校准值是允许的。

在 27m^3 混响室内，用 150—750Hz 窄带无规噪声信号测得的总声压级为 153dB 和 158dB

的声压级谱分别示于图 3。若用正弦信号扫描，混响室内最大声压级可以增加 8—10dB 达 163—166dB。在高声强时，气流扬声器产生大量高频成分，这是非线性引起的结果，低频成分也略有增加。

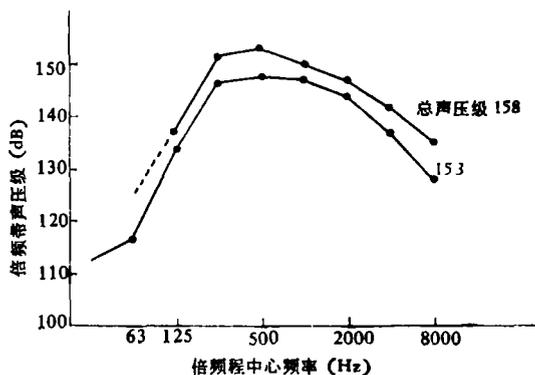


图 3 总声级为 153dB 和 158dB 的倍频程频谱

3. 声场分布

混响室内声场均匀是设计指标之一。图 4 是 27m^3 混响室中声场分布的测量结果。在 250Hz 的标准偏差低于 1.5dB。在 250Hz 以下频率，声场起伏较大，试验时需要相应地增加测点的数目。

表 2 为国内外使用气流扬声器作声源的混响室和行波管的声学特性。

表 2 混响室和行波管的特性

机 构	设 备	尺 寸 m^3	最大声压级 dB	声 功 率 kW	频率范围 Hz	扬 声 器 数 量	空 气 机 kg/cm^3
NASA	混响室	12350	153	160	3000	16	27
	行波管		169				
波音公司	混响室	19	172	60	2000	3	
	行波管		172				
通用动力公司	混响室	28	153	2	10000	2	
	行波管	2.8	158	8			
LTV 宇航公司	混响室	113	168	20	10000	10	9
	混响室	162	158				
	行波管	$15 \times 75\text{cm}$	170				
白沙靶场	混响室	27	163	20			5
	行波管	0.88×0.88	163				
Ling 电子公司	混响室	4.3	158				
	行波管		168				
声学所	混响室	100	148	1	8000	1	2
	混响室	27	158	5		4	
	行波管	$15 \times 15\text{cm}$	174	5		4	

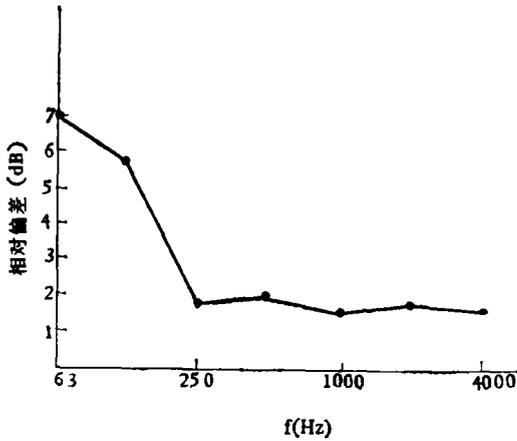


图4 混响室内声场分布的标准偏差

六、消声管道

高声强实验室中使用了气流扬声器,因此,在实验过程中,必须提供一个通道,把从气流扬声器进入混响室和行波管的空气流排出去。排气必须采用消声管道,以使出口的声压级低于85dB(A),避免影响实验室的正常工作和周围环境。图5是我所高声强实验室内消声管道的布置和其衰减量。

在我所高声强实验室的建立和特性测定中,曾经参加过工作的同志很多。马大猷教授和吕如榆同志参加了实验室的设计,张贤齐,茅宏迪,魏文,张亮等同志分别参加了实验室的建设、气流扬声器的研制和实验室特性的测量工作。

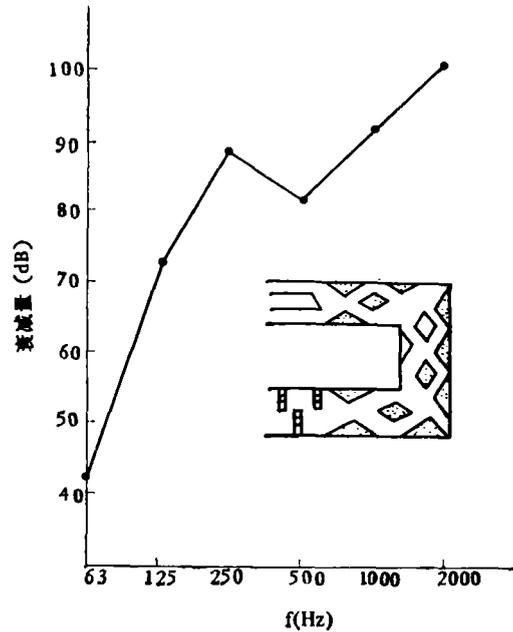


图5 消声管道的布置和衰减量

参 考 文 献

- [1] 沈燧、陈定楚、茅宏迪,声学报,2(1979),128.
- [2] 马大猷,物理学报,1(1974),17.
- [3] 沈燧,物理学报,1(1974),27.
- [4] W. R. Miller, *Proc. IES.*, 2(1967), 473.
- [5] 马大猷,科学通报,4(1964),295.
- [6] T. D. Scharton, N70-36376 (NASA. CR-11340).
- [7] R. A. Slusser, *JASA*, 53(1973), 1263.
- [8] A/TEC Corporation, "High Intensity Sound Nomograph." 1967.
- [9] W. T. Fiala, *JASA*, 38(1965), 956.

(上接第40页)

还初步说明,国产 PVDF 压电薄膜在作为超声换能器方面已达到了实用水平。

中国科学院上海有机化学研究所,五机部53所、温州压电元件厂为本实验提供了 PVDF 压电薄膜,谨致衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Kawai, *Japan J. Appl. Phys.*, 6-7 (1969), 975.
- [2] 中鉢宪贤等,应用物理,47-12(1978),68.
- [3] T. D. Sullivan, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 63-5

(1978), 1936.

- [4] 马乐山,国外无损检测,1-1(1981),21.
- [5] L. Bui, H. J. Shaw, L. T. Zitelli, W. W. Hansen, *Electronics Letters*, 12-16 (1976), 363.
- [6] R. G. Swartz, J. D. P Lummer, *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-26-12 (1979), 1921.
- [7] R. G. Swartz and J. D. P Lummer, *IEEE Transactions on Sonic and Ultrasonics*, SU27-6 (1980), 295.
- [8] W. H. Chen, H. J. Shaw, D. G. Weinstein and L. T. Zitelli, 1978 ULtrasonics Symposim Proceedings IEEE Cat. 78CH 1344-ISU 780.