

沈 豪 著



强噪声学



科学出版社

强 噪 声 学

沈 喆 著

科 学 出 版 社

1996

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了 60—90 年代作者在中国科学院声学研究所从事大功率气流调制扬声器研制和高强度噪声引起金属板材声疲劳现象以及对生物影响的主要研究成果。它介绍了航空工程中声疲劳试验的一些方法以及最新发展,讨论了噪声生物效应的一些新规律。其内容涉及物理学、空气动力学、医学、生物学以及航空工程、振动工程等领域。

本书可供从事大功率扬声器设计和噪声环境试验工作的科技人员和高等院校有关专业教师和研究生参考,也可供有关物理、航空、航天、医学和振动工程专业人员参考。

强 噪 声 学

沈 峰 著

责任编辑 郑德平

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1996 年 1 月 第 一 版 开本:850×1168 1/32

1996 年 1 月 第 一 次 印 刷 印张:9 7/8

印数:1—530

字数:257 000

ISBN 7-03-004474-6/TN·168

定 价: 20.00 元

前 言

高强度噪声学是随着现代化国防和航空航天工业发展而形成的新的声学分支学科,它涉及物理学、空气动力学、医学、生物学以及航空航天工程和振动工程等领域。发射导弹、人造卫星使用的火箭与现代喷气飞机产生的噪声约为 150—170dB。在这种强噪声场中将会出现一些新的物理和生理效应,例如金属薄板会因声致疲劳而产生断裂,从而使飞行器在飞行过程中失事;电子元器件和精密仪器会因声失效而影响遥测和遥控;对人和动物,除了损伤听觉器官以外还可能诱发一些疾病。此外高声强声波在传播过程中和材料的声吸收特性都呈现非线性现象。

1965 年在中国科学院院士马大猷教授的领导下,中国科学院声学研究所筹建了高声强实验室,设计和研制了声功率为 2kW 和 10kW 的气流调制扬声器,填补了国内这一声学领域内的空白并与工业部门协作生产了一批气流调制扬声器用来装备国内一些单位的高声强实验室。1969 年声学研究所建成高声强实验室,获得了高达 150—170dB 的噪声场。在这基础上,与西安飞机制造公司协作开展了金属板材声致疲劳和断裂的实验研究,求得了金属板材的声疲劳 L_p-t 曲线。与北京航天医学工程研究所和北京市耳鼻咽喉科研究所协作开展了强噪声对生物效应的研究。20 多年中,研究工作取得了较好的结果。研究组首次观察到强噪声使豚鼠死亡的现象,探索了噪声引起豚鼠死亡的原因,并求得了噪声场中描述豚鼠死亡规律的死亡阈曲线,这一实验研究结果曾由中央人民广播电台作了报道。

本书内容以作者长期从事气流调制式扬声器研制和高声强效应的实验研究成果为基础并总结了 70 年代以来国内外有关文献(包括 AD 和 PB 报告)以及作者和研究组同事们已发表在科学通

报、物理学报、声学学报、应用声学、电声技术和强度与环境等杂志的学术论文. 其中部分内容曾为中国科学技术大学研究生院硕士研究生讲授. 为了使内容完整些, 简单地叙述了有关航天器的一些声疲劳问题. 希望本书的出版能够有助于进一步推动环境声学中较有发展前途的高强度噪声学的研究. 由于作者从事高强度噪声学实验工作范围的局限性, 书中难免有不妥之处, 欢迎提出宝贵意见.

本书的出版得到中国科学院声学研究所各级领导的支持和中国科学院科学出版基金的资助, 在书中引用了与合作者已发表部分论文的内容. 作者在此表示由衷的感谢.

沈 峰

1992. 12. 25

于北京

目 录

第一章 绪论	1
一、引言	1
二、振动与声波	2
三、强噪声的产生	7
四、强噪声环境	8
五、强噪声的效应.....	11
六、噪声环境试验的发展.....	13
第二章 高声强实验室	16
一、引言.....	16
二、大功率噪声源评述.....	19
三、行波管和行波套管.....	21
四、混响室设计.....	25
五、高声强混响室设计的声学考虑.....	30
六、高声强混响室所需声功率的估计.....	32
七、噪声和振动的联合试验室.....	34
八、强噪声的控制和听力保护.....	36
九、国内外高声强实验室简介.....	43
第三章 大功率电动扬声器	49
一、引言.....	49
二、电动扬声器的工作原理.....	49
三、直射式电动扬声器.....	51
四、喇叭式电动扬声器.....	53
五、喇叭.....	55

六、电动扬声器组阵	57
七、国内外大功率电动扬声器简介	57
八、磁流体扬声器	59
九、电动振动台设计原理	64
第四章 气流调制扬声器	76
一、引言	76
二、气流扬声器发展简况	79
三、调制气流声源的原理	82
四、电磁式气流扬声器	94
五、电动式气流扬声器的设计原理	97
六、感应式气流扬声器设计原理	110
七、气流扬声器的实验研究	117
八、气流扬声器声辐射的实验研究	123
九、气流扬声器的语言清晰度	134
第五章 噪声的特性及其评价	140
一、引言	140
二、频谱分析	146
三、统计分析	147
四、相关分析	149
五、噪声评价	150
第六章 声致振动响应和声载荷	152
一、引言	152
二、简谐平面波声场中薄板结构的激振力	153
三、金属薄板的声致振动响应	155
四、圆柱形飞行器的声致振动	161
五、统计能量分析	164
六、矩形板的声致振动低频响应	167

七、声致振动的一些实验结果	173
八、飞机的噪声载荷	178
九、导弹头部的噪声载荷	182
十、声疲劳试验的噪声载荷谱	186
第七章 噪声环境试验和声致疲劳	188
一、引言	188
二、噪声环境试验	189
三、声致疲劳	191
四、疲劳裂纹的监察	194
五、声疲劳实验系统	195
六、金属薄板的声致疲劳和断裂	198
七、制导武器的噪声环境试验	205
八、确定结构疲劳寿命以及改进核反应堆和宇航器结构 可靠性的强噪声试验	208
第八章 电子元器件和精密仪器的声失效	212
一、引言	212
二、声激励的机理	212
三、用振动模拟声激励来试验小型电子元件	214
四、对元器件进行声和振动的实验结果	215
五、声失效的防止	216
第九章 强噪声的生物效应	217
一、引言	217
二、强噪声对豚鼠中耳、圆窗膜的影响	218
三、强脉冲声对中耳的损伤	224
四、强噪声对耳蜗组织化学影响的实验研究	227
五、豚鼠内耳声损伤的扫描电镜观察	229
六、强噪声暴露下豚鼠听觉的永久性听阈偏移	235

七、强噪声场中豚鼠死亡原因探讨	242
八、强噪声场中豚鼠的死亡阈曲线	247
九、强噪声对家兔内脏损伤的实验研究	252
十、宽带噪声对生物作用规律的探讨	258
第十章 高声强实验技术	260
一、引言	260
二、测量传声器	260
三、高声强传声器的校准	267
四、高声强测试与控制系统	272
五、频谱的实时分析	275
六、噪声场的频谱模拟	287
七、相干无规信号源的声辐射	290
附录一 强噪声环境试验规范	297
附录二 气流扬声器声功率测量方法	301
参考文献	304

第一章 绪 论

一、引 言

强噪声学(习惯上称高声强)是一门边缘性声学学科. 由于火箭、飞机、卫星、航天飞行器的发展, 产生越来越高的噪声, 它们的产生机理、声波传播及其效应已经越出经典声学的范围. 要研究和解决这类问题需要建立强噪声试验环境, 在模拟实际噪声场中结合多学科开展应用基础研究, 在若干学科的科研合作下开拓这一新的声学学科分支. 在近代声学的发展中, 一些极端的物理条件常常形成新的学科分支. 通讯、广播和放声等的应用属于 $20-20\,000$ Hz 的声频频率范围, 由 20Hz 向下一直延伸到 10^{-4}Hz , 发展了次声学, 由 $20\,000\text{Hz}$ 向上延伸到 10^8Hz , 形成超声学, 再从超声频段向上延伸到 10^{12}Hz , 发展了微波超声学. 日常生活中遇到的可听声强度大约为 $35-115\text{dB}$, 而强噪声的强度则从致聋声级 120dB 扩展到 145dB , 近年来又从 145dB 扩展到 $170-180\text{dB}$ 的高声强极端物理条件, 呈现了一些新的物理学和生物学现象. 这样高的声压已经与大气压(194dB)相差不远. 现代工业、现代国防工业和航空航天事业的发展, 使强噪声的研究不但具有理论意义而且也有实践意义.

说话的平均声功率仅为 $50\mu\text{W}$, 近距离的声压级约为 70dB . 声压比它大 1000 倍的声音(约 130dB)就会使耳朵疼痛, 甚至致聋. 常遇的噪声大都在 120dB 以下, 因此经典声学中的噪声研究工作仅限于探讨噪声对人的生理和心理影响以及相应的减噪措施和防护方法. 近年来, 火箭和喷气飞机的推力越来越大, 产生的噪声已远远超过人耳的痛阈, 它的噪声源是空气动力湍流的随机过程. 在声源处产生的噪声和它的传播扩展到非线性声学领域. 例

如,一架超声速飞机辐射的噪声功率足以开动一辆普通汽车,它产生的轰声在数万平方公里范围内都可以听到.月球探测器运载火箭辐射的噪声功率可以开动一艘航空母舰,而火箭发射场的噪声可能影响到 30km 外的居民区.由于飞行器本身处在强噪声的近场中,高强度噪声的一些物理效应和生物效应逐渐引起重视,而人对噪声的防护要求也更高.严重的噪声污染产生了工程和社会两方面的影响.例如,发动机的近场噪声在飞行器表面引起声致振动响应和结构疲劳损伤.导弹弹头附近的噪声使其中一些精密仪表失效而影响遥控、遥测.强噪声对发射场、大型飞机场附近的建筑物激发振动而产生破坏效应,对人的影响除了损伤听觉器官以外,还可以诱发一些疾病.此外在强噪声场中的非线性现象使声波传播,材料的吸声特性不能再用线性声学方法处理.强噪声对人类和生物的影响涉及医学和生物学,而实验研究需要新的电子仪表和测量方法.由此可见,强噪声学涉及数学、力学、空气动力学、冶金学、医学和生物学等学科.这是一个尚未被探索过的新领域,是在建筑声学、噪声学和电声学的基础上形成的声学的边缘学科分支.

近年来,高声强研究主要有两个方面,即高声强的产生和声致振动的效应.我们的研究工作主要涉及强噪声产生机理,气流调制扬声器的研制、噪声环境的模拟、强噪声引起的效应等.噪声环境试验是上述研究工作的基本实验方法,为此大约需要总声压级为 160—175dB,频率范围为 50—10 000Hz 的噪声试验环境,包括混响室和行波管以及相应的测量分析设备.

二、 振动与声波

振动与声波是紧密联系着的.物体振动时就激励它周围的空气质点作相应的振动.由于空气具有可压缩性,在质点的相互作用下振动物体四周的空气就产生交替的压缩与膨胀过程并且逐渐向外传播而形成声波.声也指作用到人耳所引起的主观感觉,这时常称为声音.人耳能否听到声音决定于声波的频率和强度.可听声的

频率范围为 20—20 000Hz, 它的强度范围大约为 0—120dB.

1. 振动

机械振动(简称振动)是指力学系统在观察时间内的一些物理量(例如,位移、速度或加速度)往复经过极大值和极小值变化的现象. 每经过相同的时间间隔,其物理量能够重复出现的振动称为周期振动. 完成一次振动所需要的时间称为周期,每秒完成的振动数称为频率. 不是周期性出现的振动称为非周期性振动. 最简单的周期振动是按正弦形规律变化的简谐振动. 由频率不同的简谐振动合成的振动称为复合振动. 振动的特性是指振动的类型和振动量(位移、速度或加速度)的幅值、频率、相位、振动方式和频谱等. 任何复杂的振动都可以由许多频率和振幅不同的简谐振动合成. 振动的各个基本量之间存在着简单关系. 对于简谐振动,若位移振幅为 A , 则速度振幅为 $A\omega$, 加速度振幅为 $A\omega^2$, 其中 ω 是振动的角频率. 对于多共振系统的随机振动也有类似关系.

2. 声波

当一个物体振动时就会在它周围产生声波,它是弹性介质中传播的压强、应力、质点位移、质点速度等的变化. 一般说来,凡是有弹性的介质,例如空气、液体和固体等都能够传播声波. 声波在空气中传播时只能发生压缩与膨胀,空气质点的振动方向与波的传播方向一致. 所以空气中的声波是纵波. 声波的频率相当广泛,它从 10^{-4} Hz 扩展到 10^{12} Hz. 按照频率范围,声波可以划分为次声(10^{-4} —20Hz),可听声(20— 2×10^4 Hz),超声(2×10^4 — 5×10^8 Hz)和特超声(5×10^8 — 10^{12} Hz). 本书只涉及空气中在可听声频率范围内声压级超过 140dB 的声波. 相应于振动,声波也可以区分为周期性声波和非周期性声波. 最简单的周期性声波是纯音,它是由简谐振动产生的频率固定、并按正弦律变化的波. 复声是由一些频率不同的简单声组成的. 对于周期声,其谐波的频率是基频的整数倍. 用傅里叶变换,可以把任意声波分解成一系列谐波.

3. 空气的物理特性

空气的许多物理特性对于确定声波的特性是很重要的,例如密度、压强、温度、比热和粘滞性系数等. 介质中某点的静压强是介质内该点没有声波存在时的压强. 大气压强、温度等都随地区、季节、时间而改变. 根据中纬度地区一年的平均情况, 国际民航组织 ICAO 以温度 $t=15^{\circ}\text{C}$, 大气压 $P=101\,325\text{N/m}^2$ 和重力加速度 $g=9.80665\text{m/s}^2$ 为基础, 求出标准大气在海平面的参数, 如表 1.1 所示. 另外尚有国际空间研究委员会 COSPAR 根据平均实验数据提出的国际标准大气 CIRA 数值, 它和 ICAO 数值相差不多.

表 1.1 海平面干空气的标准参数

参数名称	ICAO	CIRA, 1961	工程计算近似值
密度 $\rho_0(\text{kg/m}^3)$	1.2250	1.2251	1.2
大气压 $P_0(\text{N/m}^2)$	1.01325×10^5	1.017085×10^5	10^5
温度 $T_0(\text{K})$	288.16	289.70	288.16(15 $^{\circ}\text{C}$)
声速 $c(\text{m/s})$	340.294	340.92	340

空气中的声速等于

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}} \quad (1.1)$$

式中 P_0 是大气静压强, ρ 是空气密度, γ 是比热比. 对于空气, $\gamma=1.4$.

假设空气为理想气体, 则声速只与空气的绝对温度有关, 故声速

$$c = 20.05 \sqrt{T} \quad (1.2)$$

式中 $T=273.2+t$, 其中 t 是摄氏温度.

例如, $t=21.1^{\circ}\text{C}$, 声速为

$$c = 20.05 \sqrt{273.2 + 21.1} = 344(\text{m/s})$$

在通常室温时, 空气中声速大约为 340m/s. 一些常遇材料中的声速如表 1.2 所示.

表 1.2 常遇材料中的声速

材料名称	声速(m/s)	材料名称	声速(m/s)
空气(15℃)	340	混凝土	3700
氢	1270	玻璃	5000
水	1410	铝	5820
水蒸气(100℃)	405	钢	4905
松木	3600	铜	4500
砖	3600	铁	4800

4. 声波的传播

声波有两类:平面声波和球面声波.平面声波是波阵面具有与传播方向垂直的平行平面的声波.平面声波在空气中传播时,它的声压与质点速度同相位.在理想介质中,声压和质点速度不随距离变化.声压与质点速度的比值,即空气的特性阻抗是常数.平面声波的声强和声功率分别为

$$I = p \cdot v = p_m^2 / 2\rho_0 c \quad (1.3)$$

$$W_A = I \cdot S = p_m^2 S / 2\rho_0 c \quad (1.4)$$

式中 p_m 是声压的幅值, ρ_0 是介质密度, c 是声速, S 是波阵面面积.

球面声波是波阵面为同心球面的声波.球面声波在空气中传播时,它的声压与质点速度之间的相位差与 r/λ 成反比,其中 r 是球面声波的半径, λ 是波长.在理想介质中,声压与球面声波的半径成反比.介质的声阻抗率是复数,当球面声波的半径很大时,纯抗分量可以忽略.球面波的声强和声功率分别为

$$I = p_m^2 / 2\rho_0 c \quad (1.5)$$

$$W_A = 2\pi(r p_m)^2 / \rho_0 c \quad (1.6)$$

式中 r 是球面波的半径, p_m 是声压的幅值, ρ_0 是介质的密度, c 为声速.

在管道中,频率低于管道截止频率的声波以平面波的形式传

播. 在室外, 声源发出的声波可以沿着地面传播, 也可以进入大气层经折射后返回地面而传到接收点. 声波由声源传到接收点的声压级与声源类型、声波传播和接收器的特性都有关. 声波在空气中传播时, 球面声波除了强度随距离平方减弱以外, 还受到许多因素影响. 例如声波传播速度和大气温度梯度会改变声波传播的方向, 风会使声波产生折射, 与风向有关的扰动会使声场发生畸变, 空气的粘滞性引起声能吸收等. 高频声波的吸收甚大于低频吸收, 因此声波在大气中传播时的作用像一个低通滤波器, 它衰减了高频分量, 改变了声波的频谱, 减弱其强度并改变它的传播特性.

当声源向自由空间辐射时, 声源附近的声压和质点速度不同相的区域称为近场. 在近场中, 由于声源不同部分辐射的声波到达观察点时其振幅和相位都不相同, 因此声波的干涉图案比较复杂. 在声源附近出现了许多分布很密的极大值与极小值. 当距离甚大于声源尺度时(即在远场中), 声压和距离成反比. 明确远场与近场的概念是十分必要的. 近场区出现的声压振幅起伏的特性在实际测量中应该注意. 通常测试声源的特性必须在远场进行, 因为远场区测试结果与实际的效果相同. 满足远场的条件是辐射器尺寸甚小于测量距离, 而测量距离必须远大于 $\lambda/6$; 在声学中这种大小对比的因数通常取 5—10, 其中 λ 是声波波长.

当声源在室内辐射时, 室内声场可以看作是直达声和混响声的叠加. 由于直达声和混响声是不相干的, 它们在空间的叠加表现为声能密度相加, 这时室内的平均声能密度为

$$E = \frac{QW_A}{4\pi r^2 c} + \frac{4W_A}{Rc} \quad (1.7)$$

式中 W_A 为声源的平均辐射功率, r 为接收点到声源的距离, Q 为声源的指向性因数, R 称为房间常数,

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (1.8)$$

式中 $\bar{\alpha}$ 是房间内各表面的平均吸声系数. S 是房间内的总表面积.

声源在室内辐射的声压为

$$p^2 = W_A \rho c \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (1.9)$$

或者用声压级表示为

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (1.10)$$

室内总声压级与离声源的距离的关系和自由声场不一样. 靠近声源区, 总声压级以直达声为主, 混响声可以忽略. 在这区域以外, 总声压级以混响声为主, 而直达声可以忽略; 此时总声压级与离声源的距离无关.

在房间内, 直达声与混响声相等的距离称为扩散场距离(或称混响半径), 对不同指向特性的声源, 其扩散场距离为

$$r = 0.1 \left(\frac{QV}{\pi T} \right)^{1/2} = \frac{1}{4} \left(\frac{QS\bar{\alpha}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (1.11)$$

式中 Q 为指向性因数, S 为房间内的总表面积, V 为房间的体积, T 为混响时间. 对于无指向性声源, $Q=1$.

在房间内进行测量时, 为了避免直达声的影响, 测量传声器与声源的距离应该大于扩散场距离.

声波在房间内传播时, 由于墙面、空气、室内家具和人的吸收, 声能逐渐减弱. 这种衰变过程是决定房间音质的一个重要因素, 常常用混响时间来描述, 其定义为当声源在房间内停止发声后, 声能密度下降为原有数值的百万分之一所需的时间. 考虑空气吸收时, 计算房间混响时间的公式为

$$T = \frac{0.161V}{\bar{\alpha}S + 4mV} \quad (1.12)$$

式中 V 为房间的容积(m^3), S 为房间内总表面积(m^2), $\bar{\alpha}$ 为房间内各个表面的平均吸声系数, m 为空气衰减常量.

三、强噪声的产生

高声强实验室内进行实验研究大约需要 150—175dB 的噪声场, 并且要求频谱可以调节. 为此必须选择合适类型的大功率声

源. 强噪声的产生, 早期使用电动扬声器, 声压级最高只能到 130—140dB, 因此除了小混响室以外, 并不能够产生更高的声压级. 噪声环境试验也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. 因此 50 年代开始使用旋笛作噪声源, 它的气声效率很高, 输出功率很大, 可以获得很高的声压级. 曾经使用过正弦旋笛和无规旋笛, 它们的缺点是只能产生正弦声或近似宽带无规噪声, 其频谱中含有相当于转子速度分量的线谱并且它的输出功率和频谱不能调节. 60 年代以来广泛使用气流调制扬声器作环境试验的声源, 它不但可以产生高达 160dB 以上的声压级, 而且可以控制信号频率, 获得频谱很宽的无规噪声. 目前大功率气流扬声器系列的结构工艺和使用寿命虽已解决, 但为了满足噪声环境试验日益增长的需要, 还应该进一步研制声功率更大的气流调制扬声器. 60 年代中我们在分析气流调制声源机理和导出气流扬声器设计方法的基础上研制了输出声功率为 1kW, 2kW 和 10kW 的气流扬声器, 并且用它们装备了国内各个高声强实验室, 其声压级在混响室内达 150—160dB, 在行波管内达 160—170dB.

这种气流扬声器最早是由美国 Altac Lansing 公司研制成功的, 后来由 Ling 公司发展并研制出 2kW, 4kW, 10kW 系列, 使用气压为 2—4kg/cm², 因为它是振幅调制, 在提高高频响应方面遇到了困难, 目前最大可展宽到 1250Hz. 后来, Wyle 公司生产了 20—30kW 大功率气流扬声器, 频响小于 500Hz, 最近在它的喇叭喉部配接高频气流噪声源也可以进一步把频响扩展到 1250Hz. 在同一时期, Northrop 公司研制了高压气流调制声源, 使用气压达 8—12kg/cm², 频响也小于 500Hz, 用液压激振器推动一个蘑菇状阀门对气流进行调制, 最大功率可达 200kW, 因为在阀门附近产生振荡激波, 它近似一个方波, 故能产生较丰富的高频谐波.

四、 强噪声环境

实际中常遇的高声强噪声是飞行器飞行时由于空气的扰动、