



国家十二·五重点图书

舰船螺旋桨噪声

PROPELLER NOISE OF VESSEL

钱晓南 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助

舰船螺旋桨噪声

Propeller Noise of Vessel

钱晓南 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书对舰船螺旋桨水下辐射噪声的基本概念、噪声与水空泡化的关系、低噪声潜艇螺旋桨的研发、螺旋桨噪声的预报和评估以及低噪声螺旋桨的流体动力设计和试验等问题,作了系统的阐述。

螺旋桨发射的主要是水下辐射噪声,可能被监听到。对于军用舰艇,涉及在海洋上的安全问题。因此,有关螺旋桨噪声的技术资料处于相互保密的状态。作者根据极其有限的相关公开资料,从流体动力学的角度,对螺旋桨噪声特性进行了归纳和探讨。

希望本书能给从事有关螺旋桨噪声研究和设计的技术人员,相关专业的大学生、研究生,提供一些参考资料。也希望对在海洋上执勤时可能遇到螺旋桨噪声问题困扰的相关人员提供一些帮助。

图书在版编目(CIP)数据

舰船螺旋桨噪声/钱晓南著. —上海:上海交通大学出版社,2011

ISBN 978-7-313-06814-9

I. 舰... II. 钱... III. 船用螺旋桨—噪声—研究 IV. U664.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 177853 号

舰船螺旋桨噪声

钱晓南 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市华通印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:10.25 字数:186 千字

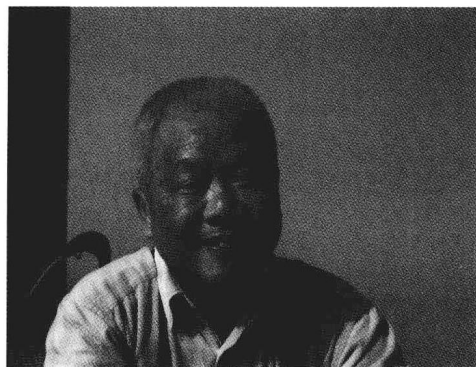
2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~2030

ISBN 978-7-313-06814-9/U 定价:150.00 元

版权所有 侵权必究

著者简介



钱晓南 上海交通大学，研究员，浙江杭州人，1933年生，1994年退休。

1959年苏联列宁格勒造船学院毕业。1959年起在上海交通大学造船系任教，历任助教、讲师、副教授、研究员。曾编写一些新教材，如船舶阻力类和船舶操纵等。1960年主持研制成功我国第一台潜体水下阻力仪。1980年代后期起参与过多型舰艇用推进器的技术研发。

1994年后，曾陆续参与有关工厂、院所民船用螺旋桨的设计和开发。

前言

近年,舰船噪声成为有关业界关心的技术问题。二战期间,在大西洋海上供应线的争夺战中出现声呐以后,降低潜艇噪声成了重要的命题。实战发现:螺旋桨是舰船的主要噪声源之一。战后随着美苏冷战的序幕拉开,利用潜艇进行攻防,成了战略性的第二次打击手段。为完成所述战略任务,潜艇必须隐蔽接近攻击对象,要求潜艇的噪声低,不被敌方声呐类装备监听到,从而开始了一场降噪的技术竞赛。作为主要噪声源的螺旋桨,也被列为降噪对象。实战、实测都肯定,螺旋桨的噪声与空泡(水空化)密切相关。战后,也有关于渔船噪声的论述,为提高渔业产量,避免鱼群闻“声”逃逸,有关研究工作主要是北欧学者进行的。总的来讲,大多研究还是带有军事目的。鉴于问题的军事性质,研究的结果大多秘而不宣。

在“船舶流体力学”及“船舶推进”类教材及课程中,关于螺旋桨水噪声很少涉及,由于缺少必要的基础知识,当年作者参与研究、开发工作,总感到底气不足。

退休以后,有了时间,能静下心来,重新学习、思考、整理当年曾遇到的各种问题,特别是涉及螺旋桨噪声的困惑,希望有所进益。

2003年,应海军工程大学熊鹰教授嘱托,为学员开一次关于舰船螺旋桨噪声的讲座,介绍点基本概念。有了机会将原来的学习笔记作一次系统整理编成讲义(第1章到第4章),并由海军工程大学学员将其打印成文。在整理资料过程中,萌生了一些想法,经与能找到的资料查对、分析后,试图提出估算螺旋桨噪声级变化的全过程,即包括:从螺旋桨无空泡时的噪声;到潜艇噪声信号谱中开始出现高频噪声信号而中频[约(3~5)kHz]仍不高的阶段;再到螺旋桨噪声完全由空泡所左右;最后,螺旋桨空泡噪声“饱和”。在2006年,将有关想法写成第5章和第6章,并送有关学者审阅。经过近几年来的整理和修改,又加上螺旋桨机动和闲置时噪声的物理分析,最后形成现在这个文稿。

笔者曾从事船舶螺旋桨的研究,是从螺旋桨流体动力的角度进入讨论领域的,书中有些问题并未看到业界人士论述过,虽经“送有关学者审阅”,当然除文责应该自负外,还必须接受实践的考核。好在讨论的是实践性极强的技术问题,实践将检验其正确性,并淘汰谬误的东西。

撰写本书时,假定读者具有舰船螺旋桨和空泡方面的基础知识,有关的名词、术语、标记,可能有重叠,为便于阅读,在书前面加了“采用的标记(symbol)及单位

(unit)符号”表,在涉及舰船推进、水动力学的标记和单位,采用[12]中的规定,在涉及声学、水噪声学的标记和单位,采用国标和尽可能加说明。由于笔者脱离工程一线多年,与近年来的国外文献、国内实践都有点脱节,难免遗漏新的文献,好在也并不追求文献汇总;仅引用论述中笔者必需交代的资料。主要希望在论述课题的物理概念方面,作点探索。现将本书整理出版,希望对从事与螺旋桨噪声有关工作的各方人士,提供点参考资料。

作者在此再次恳求:读者发现有不妥之处,请加以指正,将不胜感激。

本书中采用的标记(symbol) 及单位(unit)

A ——声强随频率变化与频率的关系中的常数, $dI/df=A/I^q$

A_d —— $A_d=\pi D^2/4$ 螺旋桨盘面积, 带有其他下标时将专门说明

BSL ——Bandwidth Sound Level, 带宽声级, 通常用后置语或下标指明带宽范围

C ——螺旋桨叶宽

CPP ——Controllable Pitch Propeller, 可调螺距螺旋桨

C_T ——螺旋桨推力载荷系数 $C_T = T/[(\rho/2)V^2 \cdot (\pi D^2/4)] = (8/\pi)(K_T/J_P^2)$

c ——水中声速(单位 m/s)

D ——螺旋桨直径

dB ——分贝

d_0 ——空泡的直径, 有时用来表示孔或其他小物体的直径, 带相应下标, 在船舶技术术语中“ d ”常特定为螺旋桨毂直径

dec ——十频程, 英文 decade 的缩写, 表示频率段的最高频率为最低频率的 10 倍

EAR ——螺旋桨盘面比; 螺旋桨展开面积 A_E 与螺旋桨盘的面积 A_d 之比

e ——饱和蒸汽气压(单位帕, Pa)

f ——频率(有时标记为 cycle per second, cps)

f_a ——频率带下标指特定“ a ”等处的频率, 例如, f_{1000Hz} 指 $f=1000Hz$

F_T ——螺旋桨推力

$F.R$ ——free running, 螺旋桨在水流冲刷下自由旋转的标记

G ——功率谱密度(power spectrum density)

$\bar{G}$ ——功率(能量)谱密度 G 进行无量纲化后的表达

H ——潜深(单位 m), 除特别说明外, 通常指螺旋桨轴系潜深

I ——声强, 即声功率

J ——螺旋桨进速系数, $J=V/(nD)$

J_P ——计及伴流后的螺旋桨进速系数, $J_P = V_P/(nD) = V_A(1-w)/(nD)$

K_T ——螺旋桨推力系数, $K_T = F_T/(\rho n^2 D^4)$

K_Q ——螺旋桨扭矩系数, $K_Q = Q/(\rho n^2 D^5) = Q\omega/(2\pi\rho n^3 D^5)$, $\omega = 2\pi n$

kn ——“节”, 速度单位, 英文“knots”的简写, 每小时航行的海里数, $1kn=0.5144$
m/s

L ——线性尺度(单位 m, ft)

$[L]$ ——基本量线性尺度之量纲标记(单位 m)

$[M]$ ——基本量“质量”的量纲标记(单位 kg, g)

m ——用作下标时指模型的相应数据

N ——每分钟转数, rotations per minute, rpm

N ——牛顿(涉及作用力时力的单位), Newton

N_i ——物体运动到空泡初生时的每分钟转数

ND ——用作下标, 表示“新设计, new design”

n ——每秒钟转数, $N=60n$; 有时在数学表达中用作待定或可指定数, 例如: 由 n 到

$$n+100, \text{ 或 } \sum_m^n x$$

oct——倍频程, 英文 octave 的缩写, 表示频率段的最高频率为最低频率的一倍, 有时用部分倍频程, 例如, $1/3 \text{ oct}$, $1/6 \text{ oct}$ 等

OSL——Overall Sound Level, 总声级

P ——螺距, 桨叶剖面绕桨轴转 360° 后前进的距离, 涉及螺旋桨时的专用标记

P/D ——螺距比, 为螺距与桨直径的比值

P ——功率(单位瓦, W)

P_D ——螺旋桨收到(或吸收)功率

p ——流体中的压力(单位帕, Pa), p 带下标时指特定含义的压力

p_0 ——流体中的静压力

Pa——帕, 压力单位, $1 \text{ Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$

prot. ——用作下标, 表示“母型, prototype”

Q ——螺旋桨扭矩, 与螺旋桨收到(或吸收)功率的关系: $P_D = \omega Q = 2\pi nQ$

q ——衰减指数, 噪声强度随频率增高而衰减的指数

R_0 ——空泡半径, 有时泛指空泡现象中“泡”的线性尺度, 用以分析空泡噪声物理现象

r ——指螺旋桨上任一点的半径, 亦用作噪声接收点到声源点距离(声源发射半径)

$\bar{r}$ ——螺旋桨上任一点的相对半径, $\bar{r} = 2r/D$

SL ——sound level 的简写, 声级, 通常前面加词语或下标, 以指明声级所指频率范围及频段特点, 例如 $SL_{(1\sim 40)\text{kHz}}$ 指 SL 式为 $(1\sim 40)\text{kHz}$ 频段之声级表达式

s ——用作下标时指实物(舰船或螺旋桨)的相应数据

T ——推力, 涉及螺旋桨时的专用标记

T ——周期性变动量的循环周期, 例如声波的周期(单位 s)

$[T]$ ——基本量“时间”的量纲标记(单位 s)

- TSL ——Total Sound Level, 全声级
- U ——速度, 通常为周(切)向速度, $U = 2\pi nr = \pi nD$
- v ——速度
- v_A ——舰船前进速度(单位 m/s)
- V_S ——舰船航行速度(单位 kn)
- v_p ——螺旋桨盘面处的速度(单位 m/s)
- W ——螺旋桨上任一点的合速度(单位 m/s)
- w ——伴流分数, 有时亦称伴流系数
- Z ——声阻抗(单位 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
- z ——舰船螺旋桨桨叶数
- z_p ——舰船螺旋桨轴数, 即螺旋桨只数
- $Z. T$ ——zero thrust, 螺旋桨零推力的标记
- β ——螺旋桨叶剖面的螺距角
- Δ ——舰船排水量(单位 m^3)
- γ ——螺旋桨叶剖面绕流的进速角
- ϵ ——降压系数
- $\epsilon_{\min}$ ——降压系数最小值
- η ——舰船推进效率系数, 常带下标说明
- η_p ——螺旋桨推进效率系数
- θ_{sk} ——螺旋桨侧斜角
- Λ ——舰船、推进器模型缩尺比, 讨论流体力学模拟问题时用
- λ ——波长
- ρ ——水密度(单位 kg/m^3)
- σ ——空泡数, 常带下标, 借以指明计算该无量纲 σ 数时所选用的速度, 例如, W 或 v_A 等
- ψ ——螺旋桨叶径向剖面线与桨叶参考线的夹角
- ω ——角速度, 以每秒弧度计, 与转数和频率的关系为 $\omega = 2\pi n$ 、 $\omega = 2\pi f$, 有时称“圆频率”(单位弧度每秒, rad/s)

目 录

第 1 章 舰船螺旋桨噪声的基本概念及定量	1
1.1 声是一种振动	1
1.2 声强	5
1.3 水噪声功率评估	8
第 2 章 螺旋桨模型噪声与实桨噪声换算	13
2.1 关于声源功率	13
2.2 空泡声相似关系——模拟系数	13
2.3 螺旋桨空泡噪声换算	19
2.4 用母型船螺旋桨估算新船螺旋桨噪声的关系式及其对降低噪声 的启示	20
第 3 章 螺旋桨噪声特点	23
3.1 螺旋桨噪声谱的变化规律	23
3.2 螺旋桨噪声总声级与噪声谱级的关系	27
3.3 任意频率的桨噪声谱级及某给定频段的带宽声级	29
3.4 关于螺旋桨噪声的若干备忘	31
第 4 章 在舰船辐射噪声中的螺旋桨噪声	35
4.1 螺旋桨噪声与空化的关系	35
4.2 空化发展对噪声的影响	39
4.3 螺旋桨噪声谱图上的最高声强谱级及谱线开始下降的频率	45
4.4 螺旋桨低噪声航速和安静航速	47
4.5 螺旋桨唱音	51
4.6 螺旋桨充气降噪——气幕降噪	53
第 5 章 低噪声螺旋桨开发及舰船螺旋桨噪声预报	54
5.1 某些潜艇用螺旋桨的分析	55

5.2	控制潜艇螺旋桨梢涡流动的讨论	60
5.3	潜艇螺旋桨噪声的一般情况	64
5.4	关于螺旋桨毂涡流动的影响(对空泡和噪声等)	65
5.5	舰船螺旋桨空泡噪声的估算	70
5.6	螺旋桨噪声的“演变区”[由无空泡时的噪声谱(-10dB/oct)到 空泡噪声谱(-6dB/oct)]	78
5.7	潜艇螺旋桨啸叫声——窄带噪声峰	85
5.8	潜艇螺旋桨噪声谱 SL 计算示例	87
第 6 章	舰船螺旋桨噪声评估	92
6.1	潜艇螺旋桨噪声的评价标准——建议	92
6.2	USS-212 型潜艇螺旋桨和苏联 33 型潜艇导管螺旋桨噪声比较	94
6.3	法国 Agosta-80 潜艇螺旋桨和俄罗斯 636 型潜艇螺旋桨噪声比较 ...	99
6.4	两型(A、B)虚拟潜艇螺旋桨的噪声比较	103
6.5	用七叶低噪声螺旋桨取代常规五叶螺旋桨的噪声变化	108
6.6	螺旋桨叶梢增载与消除窄带噪声峰	111
6.7	各种可能航速下潜艇的螺旋桨噪声	114
6.8	组成编队时各种舰船的螺旋桨噪声比较	123
第 7 章	低噪声螺旋桨设计和螺旋桨非匀速航态的一些问题	136
7.1	关于潜艇低噪声螺旋桨设计的讨论	137
7.2	关于螺旋桨模型噪声试验的问题	140
7.3	舰船机动状态下的螺旋桨噪声备忘	145
7.4	关于闲置螺旋桨的问题	146
参考文献		149

第 1 章 舰船螺旋桨噪声的 基本概念及定量

1.1 声是一种振动

水声是在水中传输的往复波。由于扰动,可能引起压力随时间的变化,这种压力变化 $p(t) = \text{Re}(pe^{i\omega t})$,还会引起水质团的涨缩运动,其速度 $v(t) = \text{Re}(ve^{i\omega t})$ (ω 为圆频率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率)。

由于介质中压力随时间而变动 $p(t)$,通常是以频域变化来计量的。若问某一频率(段)有多大的有效压力(时间平均值),即变动(脉动)压力平方的有效平均值 $\bar{p}^2$:

(1) 压力值以时间的积分值计。

(2) 信号取一段时间内的平均值,按不同频率输出。

由于实际的声压变化范围相差以百万倍计,因此“声”的计量用以 10 为底的对数(log——本书中出现的均按此定义),称为“贝尔”,又嫌这个计量“粗”(1 贝尔的差就是一个量级),故将声级 SL(Sound Level)按式(1.1)定义,即将对数值乘以 10,称为分贝 dB(decibel):

$$SL = 10 \log \frac{\bar{p}^2}{p_0^2} \text{dB} \quad (1.1)$$

式中, $\bar{p}$ 是脉动声压,其周期平均值为 0,故提出“有效平均值 $\bar{p}^2$ ”, p_0 为参照基准常量,在空气声计量中,用 $p_0 = 20 \times 10^{-6} \text{Pa} = 20 \mu\text{Pa}$ (Pa 是压力、压强的单位,叫做帕斯卡 ($1 \text{Pa} = 1 \text{N/m}^2$)) 为参照基准,后来在水声中也沿用过这个参照基准,直到二战后,水声计量中才逐渐归一到以 $10^{-6} \text{Pa} = 1 \mu\text{Pa}$ 为参照基准。因此,水声级的数值被抬高了 26dB。

实际的声含有很多频率的分量,通常分成一段段来测定,称为频段声级。在测试系统中加入一个电滤波器,滤波器对频段的通过特性是方的,即不失真地将频段内的声压信号作线性输出(与频率无关——在频段内,与信号成正比),并能将不测频段的信号滤去,仅输出需测频段的信号。

最常用于工程的是以下频段计程的带宽:

(1) 倍频程:在倍频程内最高频率与最低频率之比等于 2,故称为倍频程;该频段的声级称为“倍频程计带宽声级,BSL(oct)” (Octave Bandwidth Sound Level)。

(2) 1/3 倍频程:最高频率与最低频率之比为 $\sqrt[3]{2}:1$ 。频段内最低频率为 f_1 , 则最高频率为 $\sqrt[3]{2}f_1$;该频段的声级称为“1/3 倍频程计带宽声级, $BSL\left(\frac{1}{3}\text{oct}\right)$ ”,由于信号处理技术的限制,二战后初期大多采用这种计量。

(3) 每个频段相差 1Hz,即频段带宽也是 1Hz。所得的声级称作“谱级”(Spectrum Sound Level, SL),即带宽 1Hz 的声级。有时说,相对 $1\mu\text{Pa}$ 在距声源 1m 处的噪声谱级 dB,写成:SL dB re. $1\mu\text{Pa}$, 1m, (Sound Level relative to $1\mu\text{Pa}$ at 1m for 1Hz bandwidth)。在计算机和信号处理技术发展后,目前广泛应用。

带宽 Δf 频段的声级为

$$SL = 10\log[\bar{p}^2/p_0^2] \quad \bar{p}^2\Delta f = \sum p_n^2 df_n$$

式中,常取 Δf 频段内 $\bar{p}^2 = \text{const}$ (恒量), df_n 为更窄的带宽,例如 0.1Hz。一般地说

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{\Delta f} \sum p_n^2 df_n = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_2} p_n^2 df = \frac{1}{\Delta f} \cdot p_n^2 \Delta f_n \quad (1.2)$$

若是带宽为 $\Delta f = f_2 - f_1$,则有带宽声 $p_n^2 \Delta f$,其中, $p_n = p_{f_1} = p_{f_2} = \dots$ 。带宽声级为

$$10\log \frac{p_n^2 \Delta f}{p_0^2} = 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log \Delta f = 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log(f_2 - f_1) \quad (1.3)$$

对于倍频程计的带宽声级 $BSL(\text{oct})$: $f_2 = 2f_1$,

$$BSL(\text{oct}) = 10\log \frac{p_n^2 \Delta f}{p_0^2} = 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log(2f_1 - f_1) = 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log f_1 \quad (1.4)$$

对于 1/3 倍频程计的带宽声级 $BSL\left(\frac{1}{3}\text{oct}\right)$: $f_2 - f_1 = (\sqrt[3]{2}-1)f_1$

$$\begin{aligned} BSL\left(\frac{1}{3}\text{oct}\right) &= 10\log \frac{p_n^2 \Delta f}{p_0^2} = 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log(\sqrt[3]{2}-1)f_1 \\ &= 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log f_1 + 10\log(\sqrt[3]{2}-1) \\ &= 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log f_1 - 5.9 = SL_{f_1} + (10\log f_1 - 5.9) \end{aligned} \quad (1.5)$$

还有以十进制计的带宽声级[Decade Bandwidth Sound level, $BSL(\text{dec})$]:高、低频之差为 $f_2 - f_1 = 10f_1$:

$$\begin{aligned} BSL(\text{dec}) &= 10\log \frac{p_n^2 \Delta f}{p_0^2} = 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log(f_2 - f_1) = 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log 10f_1 \\ &= 10\log \frac{p_n^2}{p_0^2} + 10\log 10 + 10\log f_1 = SL_{f_1} + 10 + 10\log f_1 \end{aligned} \quad (1.6)$$

以上各式中 $10\log \frac{p_n^2}{p_0^2}$ 是中心频率处 1Hz 带宽的声级,即噪声谱级 SL 。由于计算的带宽不同,要加上相应的计及带宽(每增加一个计量频段)的影响,对应地为:按倍频程计量,需加上 $10\log f_1$;而按 1/3 倍频程计量,需加 $(10\log f_1 - 5.9)$;按十进制频程计量,需加 $(10\log f_1 + 10)$,才能得出相应的带宽声级。这个增加值通常称为“带宽补偿”,例如,在 f_1 频率处的噪声谱级 SL ,等于以 f_1 为中心频率的 1/3 倍频程带宽声级减去带宽补偿 $(10\log f_1 - 5.9)$ 。

每一个频程中,尚有一个中心频率,例如 $f_1 = 800\text{Hz}$ 到 $f_2 = 1000\text{Hz}$ 是一个 1/3 倍频程,其中心频率 f_m 为 $f_m = 895\text{Hz}$ 。按定义

$$f_m = \sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{2^{\frac{1}{3}} f_1 f_1} = 2^{\frac{1}{6}} f_1, \quad f_2 = 2^{\frac{1}{3}} f_1 \quad (1.7)$$

当 $n = 1$,为倍频程;当 $n = 3$,为 1/3 倍频程。带宽 Δf 与中心频率 f_m 之关系为

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 2^{\frac{1}{3}} f_1 - f_1 = (2^{\frac{1}{3}} - 1) f_1 = \frac{2^{\frac{1}{3}} - 1}{2^{\frac{1}{6}}} f_m \quad (1.8)$$

以 1/3 倍频程计量为例, $(10\log f_1 - 5.9)$ 中 5.9 为常值,在第 n 个 1/3 倍频程到 $n+1$ 个 1/3 倍频程中, $10\log f_n$ 与 $10\log f_{n+1}$ 的关系为

$$10\log f_{n+1} = 10\log \sqrt[3]{2} + 10\log f_n = 10\log 1.2599 + 10\log f_n = 1.0 + 10\log f_n$$

即带宽补偿值再增加 1dB。同理可得一个倍频程带宽补偿增加 3dB。即由于带宽度不断增大,由此引起的声压增量(仅仅由于带宽,不考虑谱级本身)是一个常值。

有时会遇到“1/3 倍频程谱级”的提法,这指的是 1Hz 带宽的噪声谱级 SL ,测点是每个 1/3 倍频程选一点,通常选 1/3 倍频程中心频率处,要与 1/3 倍频程带宽声级区分开来,前者没有加上带宽补偿。

由于压力振动,在流体中必然伴生速度变化,压力随时间而变,可以求出压力的时间平均值。与压力的频域平均值

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_2} p_n^2 df \quad (1.9)$$

一样,有压力变动的时域平均值

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad (1.10)$$

声振动的压力随时间而变,因此,此种声振动压力将引起流体的速度,与声波的压力振动一样,声波振动的速度也是声学现象的重要物理因素。振动速度级也可以表达为 L_v

$$L_v = 10\log \frac{\bar{v}^2}{v_0^2}$$

声波的振动速度应理解为流体质团的往复。 $\bar{v}$ 为相应频率处的声振动速度矢量; v_0 为选定的参照基准速度值,通常取 $v_0 = 5 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 。

已知相应频率的速度 $\bar{v}$, 可以求出位移 ξ 和加速度 a 的瞬间值。

$$v(t) = \frac{d}{dt}\xi(t) \quad a(t) = \frac{d}{dt}v(t)$$

取位移 $\xi(t)$ 为

$$\left. \begin{aligned} \xi(t) &= \xi_0 e^{i\omega t} = \xi_0 e^{i2\pi f t}, \text{ 则} \\ \bar{v}(t) &= 2\pi f \xi = 2\pi f \xi_0 e^{i2\pi f t} \\ \bar{a}(t) &= 2\pi f \bar{v} = 4\pi^2 f^2 \xi_0 e^{i2\pi f t} \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

式中, f 为频率, ω 为圆频率, $\omega = 2\pi f$ 。

当然, 将声音表示为声波的频域值和时域值都可以(见图 1-1 和图 1-2)。工程中最常用的是声级的频域特性值, 叫做声压级, 或某特定频段(如 1/3 倍频程)带宽声级。

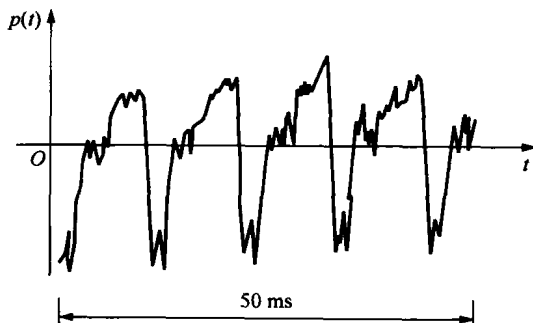


图 1-1 声压的时域信号(不同时间声压 $p(t)$ 值^[1])

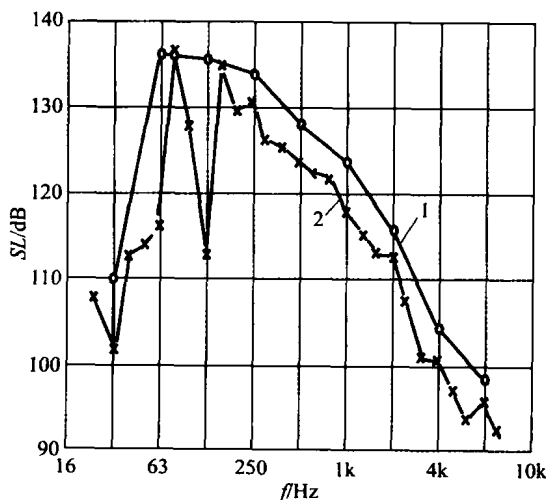


图 1-2 同一声源声级的频域信号分析结果

1——倍频程的带宽声压级 SL

2——1/3 倍频程的带宽声压级 SL^[1]

1.2 声强

压力只能通过作用于流体表面而传递,流体不能承受集中力(通常理论力学中的作用点),因此,声音的功率作用于流体中某一面上的压力引起流体沿面的法向运动的功率的时间平均值来表示,称为声强,也可认为是声功率^[1]。

$$I = \overline{\bar{p}(t)\bar{v}(t)} \quad (1.12)$$

上式为压力与速度矢量的标量积,计及大小和方向用复数实部表示瞬间压力,上面横线表示时间平均值。

$$\text{声压变化 } \bar{p}(t) = \text{Re}[\hat{p}e^{i\omega t}] = \text{Re}[(p' + ip'')(\cos\omega t + i\sin\omega t)]$$

$$\hat{p} = p' + ip'', \bar{p} = |\hat{p}|e^{i\varphi}$$

$$\text{胀缩速度 } \bar{v}(t) = \text{Re}[\hat{v}e^{i\omega t}] = \text{Re}[(v' + iv'')(\cos\omega t + i\sin\omega t)]$$

$$\text{速度矢量 } \hat{v} = v' + iv'', \hat{v}^* = v' - iv'', \hat{v} = v' + iv'' = |\hat{v}|e^{i\psi}$$

$$\hat{v}^* = v' - iv'' = |\hat{v}|e^{-i\psi}$$

以上各式中, $\bar{p}$ 为瞬间脉动声压, $\hat{p}$ 为 $\bar{p}$ 的幅值; $\bar{v}$ 为瞬间胀缩速度, $\hat{v}$ 为 $\bar{v}$ 的幅值, $\hat{v}^*$ 为 $\hat{v}$ 的共轭复数。

$$\begin{aligned} I &= \overline{\bar{p}(t)\bar{v}(t)} = \overline{[p'\cos\omega t - p''\sin\omega t][v'\cos\omega t - v''\sin\omega t]} \\ &= \overline{p'v'\cos^2\omega t + p''v''\sin^2\omega t - (p'v'' + p''v')\sin\omega t\cos\omega t} \\ &= \frac{1}{nT} \int_t^{t+nT} [(p'v'\cos^2\omega t + p''v''\sin^2\omega t) - (p'v'' + p''v')\sin\omega t\cos\omega t] dt \\ &= \frac{p'v'}{nT} \int_t^{t+nT} \cos^2\omega t dt + \frac{p''v''}{nT} \int_t^{t+nT} \sin^2\omega t dt - \frac{(p'v'' + p''v')}{nT} \int_t^{t+nT} \sin\omega t\cos\omega t dt \\ &= \frac{p'v'}{nT} \left[\frac{1}{2}t + \frac{1}{4\omega}\sin 2\omega t \right]_t^{t+nT} + \frac{p''v''}{nT} \left[\frac{1}{2}t - \frac{1}{4\omega}\sin 2\omega t \right]_t^{t+nT} - \\ &\quad \frac{p'v'' + p''v'}{nT} \frac{1}{2\omega} \sin^2\omega t \Big|_t^{t+nT} \\ &= \frac{1}{2} \frac{p'v'}{nT} [t+nT-t] + \frac{1}{2} \frac{p''v''}{nT} [t+nT-t] \\ &= \frac{1}{2} (p'v' + p''v'') = \frac{1}{2} \text{Re}\{ (p' + ip'')(v' - iv'') \} = \frac{1}{2} \text{Re}\{ \hat{p}\hat{v}^* \} \quad (1.13)^* \end{aligned}$$

也可表示为
$$I = \frac{1}{2} \text{Re}\{ \hat{p}\hat{v}^* \} = \frac{1}{2} |\hat{p}| |\hat{v}| \cos(\varphi - \psi)$$

*式(1.13) 推导见本章附录。

$$\begin{aligned}\bar{p}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{p}|^2 \cos^2 \omega t dt \\ &= \frac{1}{T} |\hat{p}|^2 \int_0^T \cos^2 \omega t dt = \frac{1}{T} |\hat{p}|^2 \int_0^T \frac{1}{2} [1 + \cos 2\omega t] dt = \frac{1}{T} \frac{|\hat{p}|^2}{2} T = \frac{1}{2} |\hat{p}|^2\end{aligned}\quad (1.14)$$

$$\text{即 } |\bar{p}| = \frac{|\hat{p}|}{\sqrt{2}} *$$

$$\text{同理} \quad |\bar{v}| = \frac{|\hat{v}|}{\sqrt{2}} \quad (1.15)$$

$$\text{故有声强的计量式: } I = \frac{1}{2} |\hat{p}| |\hat{v}| \cos(\varphi - \psi) = \bar{p} \cdot \bar{v} \cos(\varphi - \psi) \quad (1.16)$$

尽管 $\bar{p}$ 、 $\bar{v}$ 本身可能很大,但 $\bar{p}$ 、 $\bar{v}$ 的相位差 $\varphi - \psi$ 对声强度有影响,若 $\varphi = \psi$, $\varphi - \psi = 0$, $\cos(\varphi - \psi) = 1$, 有 $I = \bar{p} \bar{v}$ 。

若 φ 与 ψ 相差 $\frac{\pi}{2}$, $\varphi - \psi = \frac{\pi}{2}$, $\cos(\varphi - \psi) = 0$, 则声强 $I = \bar{p} \cdot \bar{v} \times 0 = 0$ 。

这个 $\bar{v}$ 是流体的“胀缩”运动的速度,当在发声源点,物体受到的压力 p 与运动加速度成比例,而速度是加速度的时间积分,故相位正好相差 $\frac{\pi}{2}$ 。所以,在声学中有所谓近场与假声(pseudo sound)之说。在发声点,例如爆炸中心或空泡溃灭处,会有很大的压力脉冲,但由于速度的变化与压力有相位差,实际中心处的声功率是为 0 的,即还不能输出声功率。在这个范围内,没有完全形成声场向远方发射,这个区域叫“近场”。由于水噪声研究的是不同频率的声振动,其声波波长 λ 不同,而 $\lambda = c/f$, 式中 c 为声速, f 为频率。不同频率的声有不同的波长。水中各频率的声传递速度 $c \approx 1500\text{m/s}$, 则有 $\lambda \approx (1500/f)\text{m}$ 。

表 1-1 水声波长与频率关系

波长 λ/m	150	15	1.5	0.15	0.015
频率 f/Hz	10	100	1k	10k	100k

形成这个频率的声音,至少要一个波长以外的区域才能形成一个完整的往复波。所以,假如将一个波长(距声源点)的区域叫做近场,则对于不同频率的水声,有不同尺度的近场。那里有压力脉动,有流体运动,但不能形成有效向外发射的声,这个压力脉动 $\bar{p}^2$ 的声波是“假”的,称为“假声”,亦称“伪声”(pseudosound, pseudo noise)。

* 详细推导见本章附录。