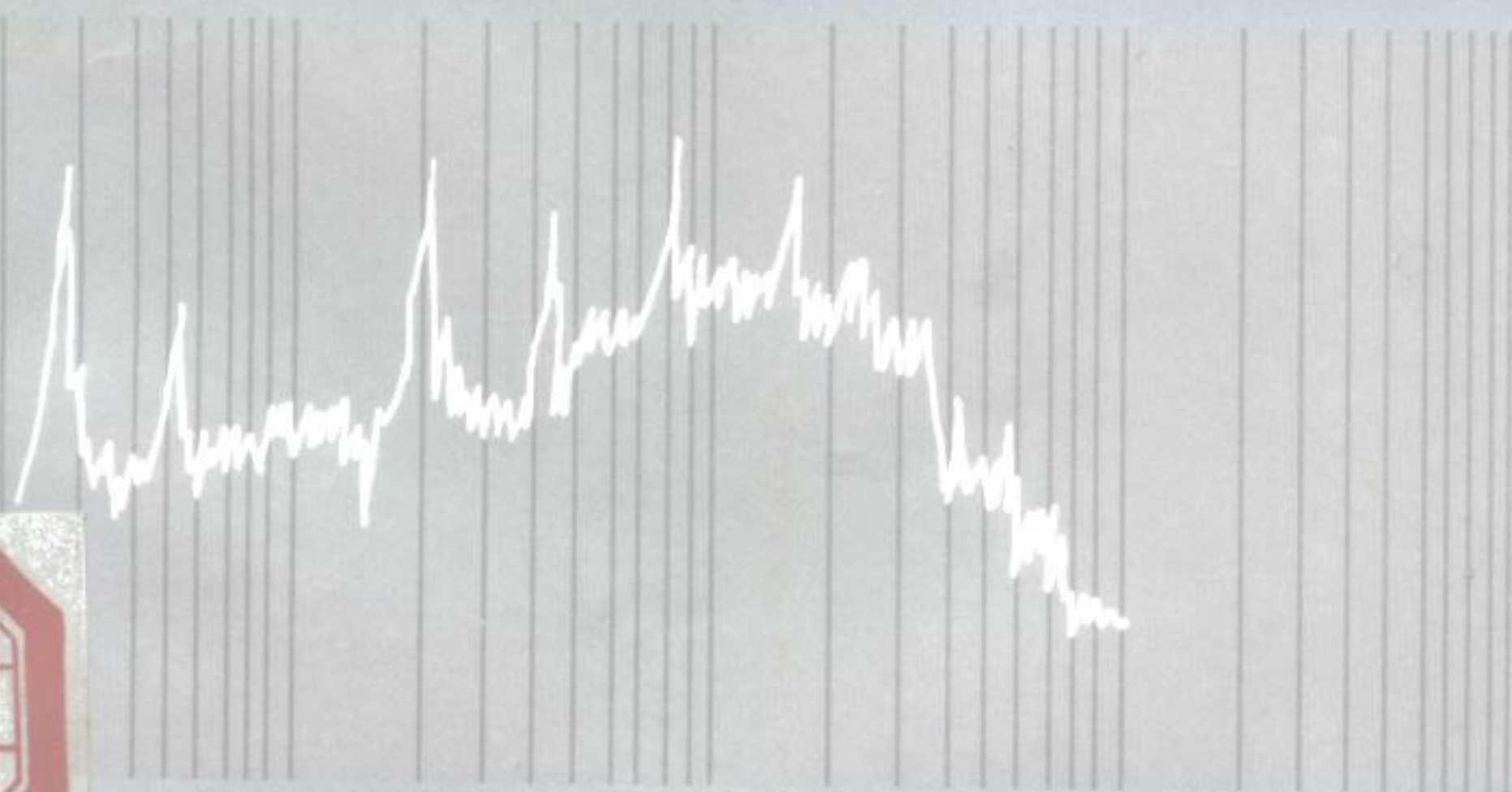


船体结构声学设计

[俄] 阿·斯·尼基福罗夫 著

谢信 王轲 译校



国防工业出版社

U663.2

N46

433740

船体结构声学设计

〔俄〕阿·斯·尼基福罗夫 著

谢 信 王 轲 译校



6



00436740

机械工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军—1998—002 号

图书在版编目(CIP)数据

DX18/59

船体结构声学设计/谢信,王轲译校. —北京:国防工业出版社,1998.5

ISBN 7-118-01794-9

I. 船… II. ①谢… ②王… III. 船体结构-声学设计
IV. U663

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 15208 号

Акустическое Проектирование

Судовых Конструкций

А. С. Никифоров

ЛЕНИНГРАД „СУДОСТРОЕНИЕ” 1990

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{3}{8}$ 179 千字

1998 年 5 月第 1 版 1998 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:16.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

目 录

序	(1)
符号	(3)
第一章 船体结构振动与声辐射的物理基础	(5)
§ 1.1 动态系统研究方法	(5)
§ 1.2 典型船体结构及其构件	(6)
§ 1.3 船体结构中产生的弹性波	(9)
1.3.1 概述	(9)
1.3.2 杆中的弹性波	(13)
1.3.3 板中的弹性波	(16)
1.3.4 圆柱壳体中的弹性波	(17)
1.3.5 无限结构中的弹性波	(19)
1.3.6 有限结构中的弹性波	(20)
1.3.7 液体附连振动质量	(32)
§ 1.4 船体结构构件的声辐射	(34)
1.4.1 概述	(34)
1.4.2 简单声源	(37)
1.4.3 弯曲振动板的声辐射	(40)
1.4.4 圆柱形壳体的声辐射	(47)
第二章 船舶的声振动源及其传播途径	(48)
§ 2.1 船舶声振动源及其谱与级	(48)
§ 2.2 声振动在船上的传播途径	(56)
第三章 船体结构的振动声学特性	(58)
§ 3.1 船体结构的机械阻力	(58)
3.1.1 基本定义	(58)
3.1.2 基础结构的机械阻力	(62)
3.1.3 组合结构的机械阻力	(70)
3.1.4 船体结构的振动激励度	(71)

§ 3.2	声振动沿船体结构的传播	(77)
3.2.1	概述	(77)
3.2.2	声振动沿均质结构的传播(波动理论)	(78)
3.2.3	有加强筋结构的波动性质	(81)
3.2.4	声振动沿不均质结构的传播(能量理论)	(83)
3.2.5	不均质结构中的波型变换	(87)
3.2.6	声振动的吸收	(88)
3.2.7	船体结构的耗散性能	(90)
3.2.8	声振动的隔离	(91)
3.2.9	船体结构的振动传导性	(96)
§ 3.3	船体结构的声辐射	(98)
§ 3.4	船体结构的隔声性	(102)
第四章	采用结构措施降低声振动	(109)
§ 4.1	从声学角度选择合适的船舶建造型式	(109)
§ 4.2	调开船体结构振动共振频率与激励力频率	(113)
§ 4.3	船体结构构件中反共振现象正效应的应用	(119)
§ 4.4	增大船体结构的抗弯刚度	(121)
§ 4.5	减低船体结构振动传导性的方法	(124)
第五章	船体结构声振动的被动阻尼	(136)
§ 5.1	被动阻尼的物理基础	(136)
§ 5.2	加载质量弹簧的机械阻力	(137)
§ 5.3	动态阻尼器	(143)
§ 5.4	声频减振器	(152)
§ 5.5	波导振动阻尼	(155)
§ 5.6	有加强筋结构弯曲振动的被动阻尼	(164)
第六章	用吸振器材降低船体结构声振动	(167)
§ 6.1	实施总则	(167)
§ 6.2	吸振的物理基础	(167)
§ 6.3	吸振器材	(170)
6.3.1	吸振隔层	(170)
6.3.2	结构吸振材料	(182)
6.3.3	散粒的吸振材料	(184)
§ 6.4	为降低船体结构的声振动而采用的吸振器材	(185)

§ 6.5	用吸振器材阻尼杆结构振动	(190)
第七章	关于船体结构声学设计的建议	(195)
§ 7.1	船舶声学设计的基本原则	(195)
§ 7.2	船用机械基座的声学设计	(197)
§ 7.3	船体结构的声学设计	(198)
§ 7.4	关于采用隔振、吸振和振动阻尼各种器材的建议	(202)
§ 7.5	船体结构声振动级和空气噪声级的计算	(205)
§ 7.6	船体结构声学设计中有限元法的应用	(208)
参考文献		(210)

序

船舶在运行过程中使用的运转设备是产生振动与噪声的根源。船舶舱室里的振动和空气噪声会使劳动条件恶化,对船员健康产生不良影响,给乘客带来诸多不便。船体结构长期的强而有力的振动,又常常是损坏船用设备及缩短船舶使用期限的重要原因。所有这些,都迫使船舶设计师和建造师们采取各种措施去降低船体结构的振动级和空气噪声级。

需要指出,在结束船舶总体设计之后再采取各种降低振动和空气噪声的办法,在大部分情况下只能局部地解决面临的问题,而且需要的费用也较大^[28],而在已经建造好了的船上,安装声学器材的代价要比在船舶设计过程中预先采取措施的费用高达 2.5 倍^[45]。

假如在船舶设计的早期阶段就考虑到声学要求,并事先完成船舶声学设计,则可用较少的费用而获得颇大的降低振动级和噪声级的效果。

船舶声学设计包括:选择声学上合理的船舶建造型式;船用设备本身的声学设计,其目的在于把它的振动活动性减到最低限度;船体结构的声学设计;设计并在船上最合理地布置减振消声器材。

用一部科技专著的篇幅才能详尽、综合地研究船体结构声学设计的全部问题。本书中,主要是叙述船体结构声学设计的原理,以及根据船舶的用途,从声学着眼选择合理的建造型式的各种问题。书中还列有主要船用设备的振动噪声特性有关资料。借助这些资料,可在船舶设计早期阶段选择该设备从声学来看最为正确的类型。

书中很大一部分用来介绍船体结构,如船用基座、隔壁、板架、

船体构件等的振动噪声特性,指出了在设计这些结构时,采用什么方法才能最大限度地改善它们自身的振动噪声特性(振动传导性、振动激励性、隔声性和声辐射性)。同时,研究了船体结构参数对配置在结构中的减振降噪器材声学效果的影响,提出了有关船体结构设计的旨在提高这些器材效果的建议。

本书还列出了制造船体结构用的各种材料的不同振动声学特性、计算公式,以及得到的计算与测量结果。这些公式中的大部分经过系统整理,并以综合表形式提供于本书的相应章节之中。书中列出的数据和建议可以用来选择船舶振动声学特性曲线上的最佳值。

对实际计算中最常用的公式和定义,均附以具体例题和插图,加以说明。为了便于查找必需的数据和参考资料,书末列有文献目录。在正文之前,排有本书采用的统一符号。

应该指出,阻碍船舶声学设计广泛应用的原因是,缺乏相当完整的基本原理概念。本书的目的之一正是弥补这一不足。

意见和要求请寄往下列地址:191065,圣·彼得堡,果戈里大街8号《造船》出版社。

符 号

B —抗弯刚度	c_0 —声速
D —抗拉刚度	f —频率
E —杨氏模数	h —板(壳体)厚度
F —动力	j —虚数单位
G —抗剪弹性模数	k —波数
I, I_p —轴惯性矩, 极惯性矩	l —长度
K —刚度; 液体压缩模数	m —单位长度(表面积)质量
L_p —相对 $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^2$ 的声压级, dB	p —声压
L_{ξ} —相对 $\xi_0 = 3 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$ 的声压级, dB	η —损耗系数
M —杆(板、壳体)的质量; 力矩	t —时间
N —旋转频率(转速)	ξ —杆(板、壳体)截面横向振动的振幅
$N_{\text{声}}$ —声功率	ζ —杆(板、壳体)截面纵向振动的振幅
R —半径; 辐射阻力	θ —杆(板、壳体)截面的扭转角
S —面积	λ —波长
Z —机械阻力	μ —数值比
Y —机械柔顺度(振动激励度)	ρ —密度
3H —隔声度	σ —泊松系数; 辐射系数
BH —隔振度	ω —角频率
c —波相速度	δ —衰减常数
	$\langle \quad \rangle_v$ —按参数 v 求的平均值

u', u'' — 坐标导数

$\dot{u}, \ddot{u}$ — 时间导数

Δ — 数值差

Θ — 效果

$\operatorname{Re} u$ — 复数 u 的实数部分

$\operatorname{Im} u$ — 复数 u 的虚数部分

注脚: Π — 板; σ — 杆; ϕ — 壳体; p — 加强筋; Π — 纵向波; Π — 弯曲波; c — 剪切波; κ — 扭转波。

第一章 船体结构振动与声辐射 的物理基础

§ 1.1 动态系统研究方法

船体结构和装上面的设备以及周围的水介质是一个复杂的动态系统。对这一系统的研究,包括确定它的各个构件振动振幅的频率特性及其辐射的空气噪声。

振动和声辐射的古典理论是建立在微分方程的解法,以及借助于各构件之间和同周围介质之间的接合部材料连续性所形成的边界条件,并把这些解法连接起来的基础之上。上述微分方程是描述动态系统单个构件,同时考虑到它们和周围介质的相互作用的惯性、刚性性能。

寻找这些解算方法是非常繁杂的过程,在大多数实际情况下,还是实现不了的。这是因为对被研究的动态系统复杂的各构件,不可能预测出未知的解算方式;此外,能很好描述最简单动态系统的古典理论若应用在复杂的工程结构方面,则由于实际的边界条件与它们的数学模型之间的差异而不能保证足够的解算精度。

鉴于上述原因,在实践中常运用近似方法进行动态系统的振动及声辐射的研究。在这些方法当中,主要有:

(1)描述动态系统振动和声辐射的统计法(能量法)。这个方法是以统计物理学的原理为基础的。在上述构件数量有足够多的条件下,在所讨论的频率范围内,它可以很好地描述这些系统各构件的平均振动声学特性。此法是由卢·莱昂(P. Лайон)创立的。它在船舶结构方面的应用,在文献[19]中得到发展。统计理论在中、高

声频范围内有足够的精度。

(2)解算动态系统振动和声辐射问题的近似数学法。它是以使用实际结构的振动和声辐射的古典理论各种方法为基础的。在这些结构中,只考虑它们对最终结果有影响的主要参数。这些数学方法在文献[19,35]中得到广泛应用。

(3)动态结构的振动模式分析法。它是建立在经过认真研究的电路理论方法基础之上。这种方法的基础是,假定分散参数系统固有振动的单个模式与集中参数系统一样^①,可以按照滤波器的模拟法(类比法)加以研究。这种模拟法能使我们比较容易地、相当准确地描述非常复杂的动态系统。振动模式分析法实际的重要性还在于它使我们有可能应用矩阵法进行计算。

(4)有限元法。它是以将结构划分成若干单元为基础的。单元的尺寸要远远小于这些结构中弹性波的波长。利用有限元法实际上可以计算任意结构中的振动场,但是它要求使用大容量的电子计算机。

所有上面列出的研究动态系统的振动和声辐射的方法,都在本书推导计算公式中得到某种程度的运用。

§ 1.2 典型船体结构及其构件

可在其中传播声振动的船体结构示意图见图 1—1。这些结构主要可分成三组:用加强筋加固的板(板架);无加强筋板(均质板);一维结构。

第一组结构包括隔壁、甲板、板架构件和船体外板,这些结构构成船体结构的大部分。这种结构(见图 1—2)是由一些平板或弯板及装在其上面的横向平行加强筋(或肋骨)与纵向加强筋相互垂直的骨架(构架)构成的。上述有曲度的弯板主要安装在船体外板的首部、尾部和艏部。有加强筋板的几何特征值,主要是板的厚度、

^① 用于集中参数系统的振动模式分析法有时叫做阻抗法。

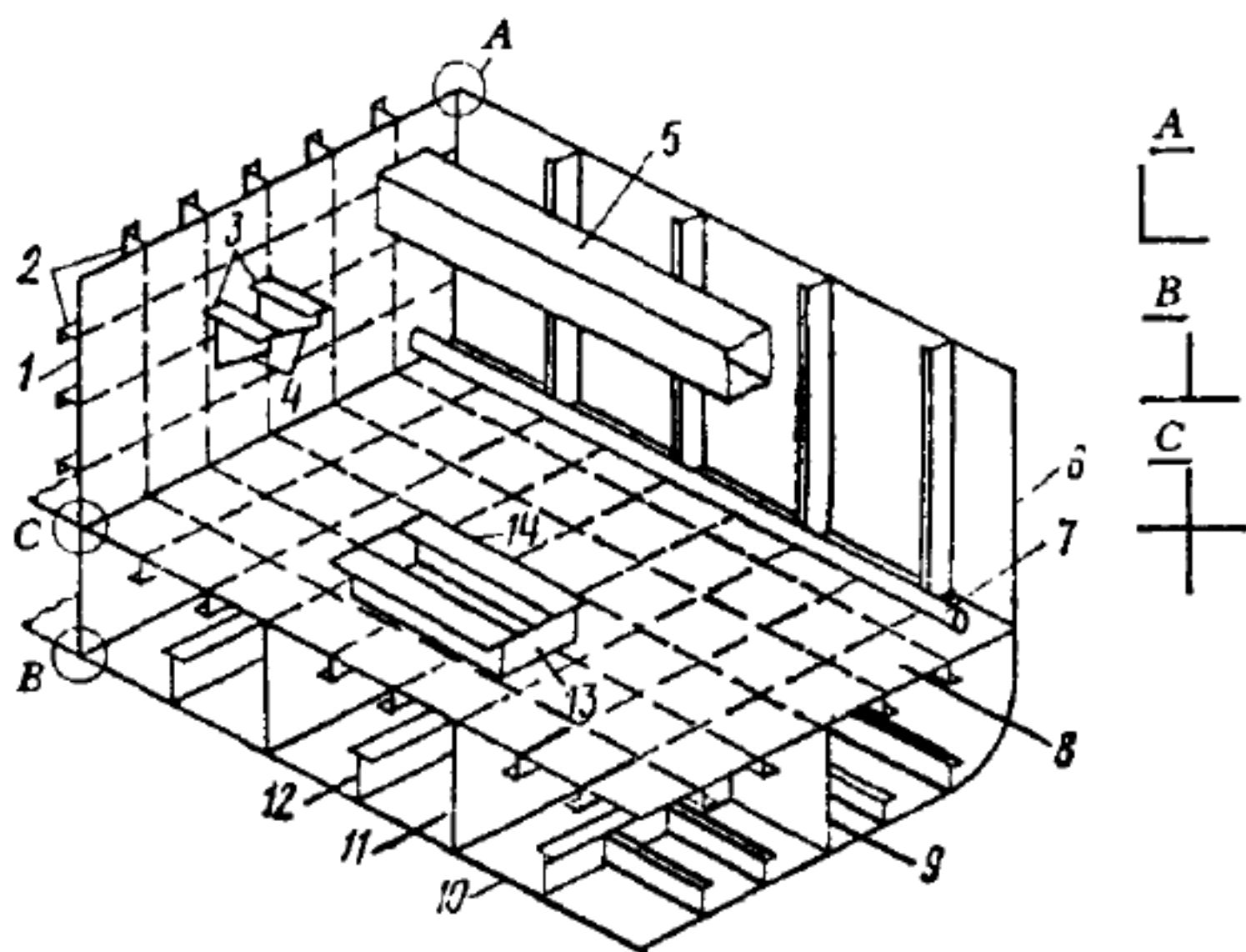


图 1-1 典型船体结构示意图

1—隔壁; 2—加强筋; 3—悬臂型基座安装板;
4—悬臂型基座的支承构件; 5—通风管; 6—
船舷外板; 7—管路; 8—第二层底板; 9—纵
桁; 10—船底外板; 11—肋板; 12—肋骨; 13—
加固型基座的支承构件(肘板); 14—加固型
基座的安装板; A, B, C—船体结构的典型连
接(接头)。

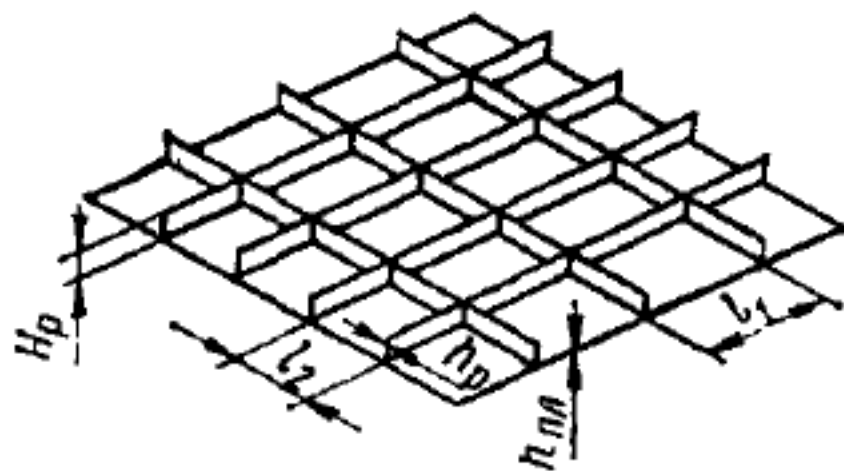


图 1-2 用加强筋加固的船体结构图

加强筋的横截面和加强筋之间的距离。

第二组结构主要是用于构成船用设备的安装基座的板结构, 最为常见的是加固型基座和悬臂型基座(见图 1-3)^①。这两型基

① 梁型和框架型基座一般属于机械的减振固定件范围, 故本书不予研究。

座都是由彼此间通过一定方式连接起来的均质板组成的,它们具有安装板和支承构件(肘板)。安装板用于固定船用设备(用或不用减振器);支承构件用于支撑和连接基座安装板和安装基座的船体结构。为了使基座的上述板具有必需的强度性能,常使用加固肘材把这些板分割成若干部分。这些基座的特点是,加固型基座的安装板与船体安装结构是相互平行的;悬臂型基座的安装板与船体安装结构是相互垂直的。上述基座的主要几何参数见图 1—3。

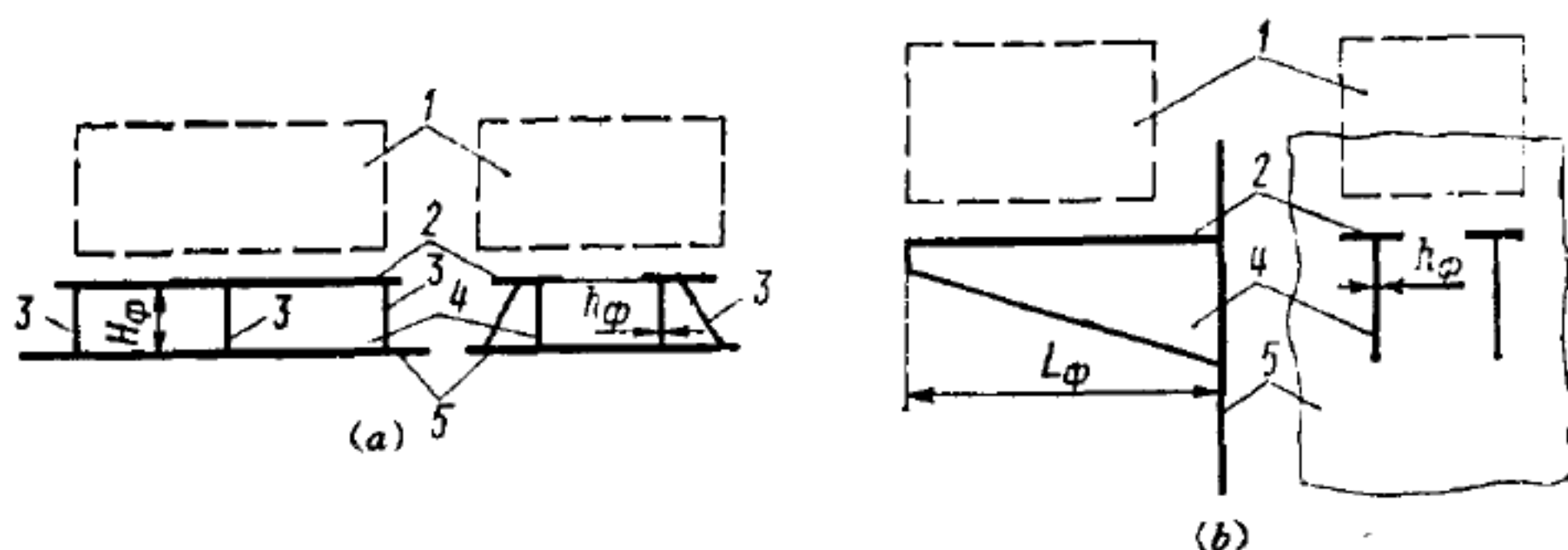


图 1—3 安装设备用的船体基座图

(a)加固型基座;(b)悬臂型基座。

1—振动活动性强的机械;2—基座安装板;3—肘板;4—基座支承板(肘板);5—船体安装结构。

空气导管、管路和轴系等属于第三组结构。空气导管为箱式结构;而管路和轴系为圆柱式(筒形)结构。前者的特性几何参数是板的厚度和横截面的尺寸;而后者的参数是外径或内径和壁的厚度。

一般说来,船体结构的典型构件主要有:杆(加强筋、肋骨);板(基座、隔壁、甲板、肋板、纵桁、船体外板、空气导管);壳体(管路、轴系)。船体结构典型的节点是上述各构件的接头(见图 1—1)。这些接头可能是板的角连接、T 形连接和十字连接,还有杆与板的连接,如穿过船体结构的管路所构成的连接。

§ 1.3 船体结构中产生的弹性波

1.3.1 概述

在无限的固体物中,可能产生两种变形——压缩和剪切。在这种物体中,这些变形以纵向和横向弹性波形式传播,其速度分别为:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1-1)$$

$$c_2 = \sqrt{G/\rho} \quad (1-2)$$

固体中存在两种波,是因为不仅在体积畸变(压缩)时,而且在形态畸变(剪切)时,在固体中都产生弹力。

从式(1-1)和式(1-2)中可以看出,弹性体内的速度 c_1 和 c_2 值决定于该物体的三个物理机械参数——杨氏模数 E 、抗剪弹性模数 G 和质量密度 ρ 。这些参数值以及某些造船材料的弹性波速度值,见表 1-1。

与固体不同,液体和气体中的弹力只产生在体积畸变的时候,因此在它们里面只有纵向波(声波)。这些波的传播速度为:

$$\text{液体中,} \quad c_1 = \sqrt{K/\rho} \quad (1-3)$$

$$\text{气体中,} \quad c_1 = \sqrt{\gamma P_0/\rho} \quad (1-4)$$

式中 K ——液体全面压缩模数; P_0 ——气体中的静压力; γ ——压力和速度恒定时的比热(容)比。

正如式(1-3)和式(1-4)得出的结论那样,液体和气体中的声波速度特点是,对液体来说,速度值实际与静压力、温度无关;而对于气体,则与这些参数有密切关系。液体有气泡,会严重降低它的模数 K ,因而也就相应地降低在这一液体中传播的声波速度。比如,当水中含有 0.1% 的气体时,声速便由 1500m/s 降到

表 1-1 某些造船材料的物理机械参数

材 料	杨氏模数 $E \times 10^{10}/\text{Pa}$	抗剪弹性模数 $G \times 10^{10}/\text{Pa}$	泊松系数 σ	质量密度 $\rho \times 10^3/(\text{kg}/\text{m}^3)$	压缩波速度 $c_1 \times 10^3/(\text{m}/\text{s})$	剪切波速度 $c_2 \times 10^{-3}/(\text{m}/\text{s})$	损耗系数 $\eta \times 10^{-3}$
钢	21	8.14	0.29	7.8	5.94	3.22	0.1
铝合金	7.2	2.77	0.3	2.8	5.87	3.14	0.5
玻璃钢	2.1	0.955	0.1	1.7	3.55	2.36	13
胶合板	0.34	—	—	0.8	—	—	13
木质纤维板	0.3	—	0.17	1	—	—	20
玻璃	6	—	—	2.5	4.9	—	1
木材	0.1~0.5	—	—	0.4~0.8	2~3	—	10
铜	12.5	4.5	0.35	8.9	3.7	—	2
黄铜	9.5	3.6	0.33	8.5	3.2	—	1
有机玻璃	0.56	—	—	1.15	2	—	20
混凝土	2.6~9.5	—	—	1.3~2.3	1.8~3.5	—	4~10
软木	—	—	—	0.24	0.48	—	—
砂子	—	—	—	1.6~2.2	0.15	0.1	0.1

400m/s(在标准大气压力下)。

表 1—2 所列为船舶实践中见到的各种液体和气体中的声波速度值。表内还列有这些物质的质量密度。换算有别于 20℃ 的温度 T 的气体中的声速值,可按下式进行^[29]:

$$c_1(T) = c_1(20) \sqrt{1 + \frac{T - 20}{273}}$$

在实际结构中(杆、板和壳体)存在着边界,因而导致其中附加弹性波型的出现。这一点将在下面加以讨论。

表 1—2 船舶实践中见到的某些液体和气体的物理机械参数

介 质	质量密度 $\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	声 速 $c_0 \times 10^3/(\text{m}/\text{s})$	声阻抗 $\rho_0 c_0/(\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$	温度 /℃
海水(3%盐)	1.03×10^3	1.5	1.545×10^6	10
蒸馏水	1×10^3	1.43	1.43×10^6	0
空气(1013 hPa)	1.29	0.333	0.433×10^3	0
	1.24	0.344	0.416×10^3	20
水蒸气	0.54	0.45	0.243×10^3	130
酒精	0.79×10^3	1.15	0.91×10^6	20
汽油	0.75×10^3	1.19	0.89×10^6	20
滑油	0.92×10^3	1.39	1.28×10^6	.

所有弹性波型都具有以下参数:

(1)波速:变形或波能的传播(转移)速度 c_s ,有时也叫波群速度;另外,还有弹性波相的传播速度 c ,也可称波相速度或相速,它取决于变形或波能传播的波长,即同相振动的介质两点间的距离,无弥散时(与频率有关),波相速度与波群速度值一致。

(2)波数:

$$k = \omega/c \quad (1-5)$$