

船舶减振降噪

技术与工程设计

朱石坚 何琳 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了船舶减振降噪的理论、近代技术及工程设计原则,并较为深入地讨论了国际发展现状,内容包括:振动、噪声的要求,动力装置隔声设计,船舶减振元件,减振效果评估方法,吸振材料、涂层和结构,振动过程的一般数学描述方法,隔声结构基本原理,消声瓦等。

本书可供从事船舶设计研究的人员和相关专业的研究人员使用。

船舶减振降噪技术与工程设计

朱石坚 何 琳 编著

责任编辑 冯贵层

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉大学出版社印刷总厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2002年5月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

2002年5月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 1~1500 字数: 336 000

ISBN 7-03-010454-4/U · 19

定价: 38.00 元

前 言

随着科学技术的迅猛发展,船舶特别是舰船动力机械的振动和噪声和控制问题已成为船舶设计和制造者们越来越关注的重要问题之一。民用船舶动力机械的振动和噪声不但影响舱室的居住性,而且会影响船员的工作,危及船舶的安全性。舰船动力机械的振动和噪声还会影响舰船的水声隐身性能,严重时使舰船丧失应有的战斗力,这一情况随着动力机械向高速强载方向发展已变得越来越突出。

为提高我国船舶特别是舰船动力机械的减振降噪水平,历年来从事船舶动力机械减振降噪工作的人们进行了许多卓有成效的研究工作,取得了许多令人瞩目、大大改善船舶振动和噪声状况的研究成果。为了系统地总结阐述有关船舶动力机械减振降噪的有关问题,本书简略地介绍了船舶减振降噪的基本理论、近代技术及工程设计原则。特别是详细介绍了俄罗斯的研究成果。希望本书对从事船舶减振降噪工作的人们有所帮助。

欧阳清博士设计了本书的插图,姜荣俊、翁雪涛、赵应龙、何其伟、帅长庚、楼京俊等博士阅读了本书手稿的部分章节,提出了许多宝贵意见,沈晓丹小姐仔细打印了全部手稿。在此一并表示衷心的感谢!

尽管我们尽力想奉献给读者一个完整的船舶动力机械减振降噪的图像,但由于水平有限,在内容安排上的不协调及错误在所难免,敬请读者指正。

作者

2002 年 5 月

目 录

第一章 船舶振动和噪声级要求	(1)
1.1 船舶声场、声源和基本分量	(2)
1.2 振动和噪声级限值的作用和意义	(8)
参考文献	(12)
第二章 船舶动力装置隔声设计	(14)
2.1 噪声源与低噪声设备的选择	(14)
2.2 振动和噪声的传递途径	(16)
2.3 动力装置的合理布置	(17)
2.4 隔声装置的使用	(25)
参考文献	(39)
第三章 船舶减振元件	(41)
3.1 船舶减振元件的用途、类型和主要性能	(41)
3.2 橡胶金属减振器	(43)
3.2.1 橡胶的物理机械性能	(43)
3.2.2 描述粘弹性材料机械性能的诸物理量之间的主要关系式	(45)
3.2.3 橡胶性能与温度-频率的关系	(50)
3.2.4 橡胶金属减振器的基本设计原理	(53)
3.2.5 橡胶金属减振器的典型结构	(65)
3.3 气动减振器	(77)
3.3.1 回转形囊壁气动减振器参数的选择	(81)
3.3.2 气动减振器结构	(92)
3.3.3 自动调整气动减振器的若干动力学特点	(101)
3.4 金属减振器	(117)
3.5 磁液减振器	(130)
3.6 管路中的挠性连接件	(132)

参考文献	(268)
第六章 吸振结构振动过程的一般数学描述方法	(274)
6.1 稳态激励时用复固有振型分析复杂结构的振动性能	(275)
6.2 表征大阻尼系统中吸收振动能的诸物理量之间的相互关系	(278)
6.3 大阻尼系统中的瞬态振动过程	(287)
6.4 高频振动过程	(289)
6.5 吸振效率的评估	(296)
参考文献	(302)
第七章 隔声结构基本原理	(309)
7.1 单层隔声屏障的反射系数和透射系数	(309)
7.2 多层介质的反射系数和透射系数	(312)
参考文献	(315)
第八章 蜂窝状多孔金属材料隔声装置	(318)
8.1 蜂窝状多孔金属材料的结构特点和特性	(318)
8.2 孔隙金属结构特性和吸声特性的相互关系	(324)
8.3 蜂窝状多孔金属材料组成的多层隔声结构的计算示例	(327)
参考文献	(332)
第九章 消声瓦	(333)
9.1 消声瓦分类	(333)
9.2 防舰艇声纳的消声瓦	(336)
9.3 消声瓦隔声效率的评估	(341)
9.4 消声瓦各层的声学特性	(347)
参考文献	(349)
第十章 主动补偿振动场和噪声场的基本研究方向	(354)
10.1 主动补偿系统及其分类	(354)
10.2 主动补偿系统的发展概况及发展趋势	(355)
参考文献	(368)

第十一章 机器和机械主动消振系统最佳特性的测定	(385)
11.1 主动防振系统效率评估准则	(385)
11.2 补偿力矢量计算	(388)
参考文献	(396)

第一章 船舶振动和噪声级要求

考虑到保护船上工作人员的健康和在工作、休息的舱室营造正常的交往和舒适条件的必要性,建立了限制各种用途船舶舱室的空气噪声级和振动级的标准。随着船舶动力装置向轻型和强载方向发展,船舶的噪声级越来越大,使得满足其噪声和振动限值的任务变得越来越困难。因此,控制噪声和振动使其满足标准是船舶设计的关键,对战斗舰艇特别是潜艇来说,其噪声和振动指标更是主要的战术技术指标之一,它在舰艇的建造中起着特别重要的作用。

无论是空气噪声级还是振动级均与频带有关。可以是整个声频带范围内的总噪声级,也可以是平均频率为 16、31.5、63、125、250、500、1000、2000、4000、8000、16000Hz 的倍频程带声级值。宽带谱噪声往往用 1/3 倍频程滤波器(其上下截止频率之比为 $\sqrt[3]{2} : 1$)分析,因为人的耳朵将宽带谱近似分为 3 度^[1]。在调查噪声和振动源以及对舰艇提出辐射噪声要求时,也可在窄频带范围内分析目标的声学特性。现代声学仪器的频率分辨率可达十分之几 Hz。

空气噪声和结构噪声的大小主要取决于声源的声功率和振动功率。声源的声功率的量度单位是声功率级 L_w ,其定义为

$$L_w = 10 \lg \left(\frac{W}{W_0} \right) \text{ dB}$$

式中 W ——声源的、以瓦特(W)计的声功率;

$W_0 = 10^{-2} W$ ——空气噪声的参考声功率。

气体和液体的声压级 L_p 按下列公式计算:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ dB}$$

式中 p ——实际声压有效值；

$p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ——参考声压。

除声压外，声波振动速度是一个最重要的待测量。振动速度级按下列公式计算：

$$L_v = 10 \lg \left(\frac{v^2}{v_0^2} \right) \text{ dB}$$

式中 v ——相应频带的速度有效值；

$v_0 = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ——参考速度。

对于正弦振动过程，振动加速度 $\ddot{q}$ 与振动速度 $\dot{q}$ 及振动位移 q 之间的关系为 $\ddot{q} = j\omega\dot{q} = -\omega^2 q$ 。振动位移级、振动加速度级的定义如下

$$L_q = 10 \lg \left(\frac{q^2}{q_0^2} \right) \text{ dB} \qquad L_{\ddot{q}} = 10 \lg \left(\frac{\ddot{q}^2}{\ddot{q}_0^2} \right) \text{ dB}$$

式中 $q_0 = 8 \times 10^{-12} \text{ m}$ ； $\ddot{q}_0 = 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 。

对较宽的分析频带，按下列公式取在各窄频带测得的振动级的平均值：

$$L_z = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i} \right)$$

式中 n ——分析频带所包含的窄频带的个数。

1.1 船舶声场、声源和基本分量

船舶声场指的是外部大气中的噪声、船舶水下噪声（水中声场）以及舱室内的空气噪声和结构噪声（振动）。以上声场的主要声源可分为两类：

- (1) 机械性质的声源；
- (2) 流体动力形式的声源。

属于第一类声源的有船舶设备（机械、系统、装置等等）。流体

动力噪声是由以下原因引起的：

- (1) 水与桨舵组合推进装置之间的相互作用；
- (2) 船体外表面以及船的附体和上层建筑上的紊流边界层；
- (3) 绕孔和附体的环流形成的涡流结构；
- (4) 空泡；
- (5) 兴波。

由第一、二类声源形成的声场的特点是声级与船舶运动速度存在着不同的关系。在停泊和低航速时，船舶噪声主要由机械性质的声源造成，这种噪声的总声级随航速的变化一般不大。与此相反，由流体动力和空气动力形成的噪声级随运动速度的增大而迅速增加（一般按三次方规律增加，在空泡状况时按更高次方规律增加）。高航速时，这种噪声是船舶声级的主要贡献者。特别是对水中声场和直接位于该类声源附近的舱室中的噪声场更是如此。

形成船舶声场的还有所谓的生活噪声。生活噪声的产生同船员和旅客的生命活动、舱门和舱口盖的开关、通过无线电通信网发送音响信号和口令等有关。生活噪声一般是非定常的，其时间历程是持续时间各不相同的单个脉冲。

以上关于声源的分析实际上适应于所有级别和用途的船舶。然而，在某些船上可能出现特殊的声源，这类声源在一定条件下可能占主导地位。破冰船舶体和螺旋桨与冰块相互作用时产生的噪声就是一个突出的例子。

船舶声场及其声源的组成框图见图 1.1^[2]。

1. 舱室噪声

任何机械都会产生两类噪声^[3]。第一类噪声是声能直接辐射到舱室空气介质中而产生的，称之为空气噪声。这类噪声以声波的形式从机械表面辐射出去，并被反射面和其他机械表面反射回来。

由各种机械产生的第二类噪声同振动激励有关，称之为结构噪声。根据振动激励的物理性质，分为初级结构噪声和次级结构噪声。初级结构噪声是经机械的支承连接件和非支承连接件（管路、电缆等等）传递的动力激发的结构振动。初级结构噪声级的大小与

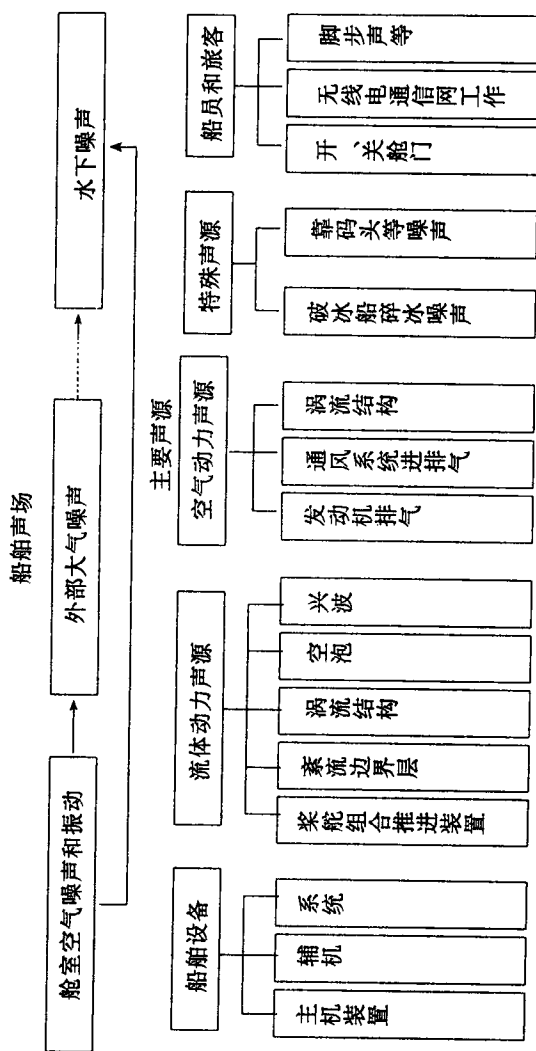


图 1.1 船舶声场及其声源的组成框图

机械振动状况、底座特性、隔声装置效率等多种因素有关。

次级结构噪声是由机械空气噪声激励而引起的结构中的结构振动,其声级的大小与结构的惯性、刚性和阻尼,以及空气噪声级等有关。

随着离声源的距离的增加,空气噪声和结构噪声减弱。因此,噪声和振动最大的机械所在的舱室就是噪声最大的舱室。属于这类机械的有主机、航行和停泊的柴油发电机组、压气机组、泵等等。船舶通风系统(空调系统)和液压系统也产生相当大的振动和噪声,这类系统的噪声源是通风机和泵以及分配装置和调节装置。

舱室噪声还与某些流体动力和空气动力声源有关。影响最大的此类声源是螺旋桨^[4]。舱内因螺旋桨旋转而产生的噪声主要与船体低频振动激励有关。这种振动的原因是螺旋桨叶片与水相互作用时叶片上出现动力,这些力经结构通道(例如经轴系推力轴承和支承轴承)和水通道传递给船体。这些通道的传递性能取决于叶片边缘与船体结构之间的最小距离,以及船体结构的动态刚度。当频率是叶片数 z 与主轴系每分转数 n 的乘积 nz 是60的倍数时,激励力最大。相应的频率构成叶频的级数 $f^{(i)} = f_p \approx nzi/60$ ($i=1,2,3\cdots$)。这个级数的某一频率与船体弹性振动固有频率吻合时,船体振动和舱室噪声出现极大值。一般来讲,振动和噪声级随着转速(n^3)和螺旋桨直径(D^4)的增大而增加。

船舶绕流面同水和空气的相互作用可能导致出现涡流结构。从振动和噪声形成的角度来看,与内阻尼小的结构相互作用的周期涡流结构影响最大。在内阻尼小的结构中,特别是当涡流形成频率与结构的低阶弯曲振动固有频率吻合时,将会产生共振现象,导致很大的振动和噪声^[5]。

在一定条件下,空泡和兴波也可以形成舱室噪声。由各种物理性质的声源形成的舱室噪声总方框图见图 1.2^[2]。

2. 外部大气噪声

船舶外部空气噪声主要声源如下^[6]:

- (1) 主机和辅机通气管路;

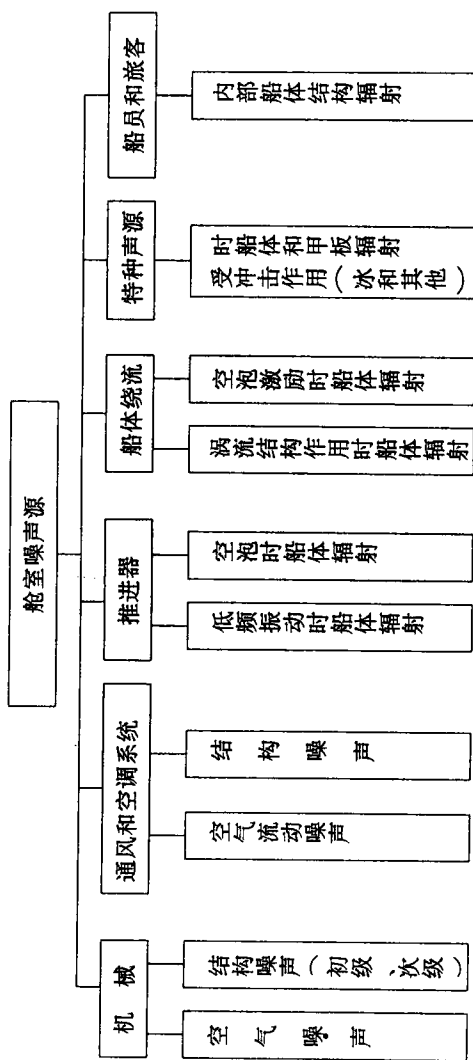


图 1.2 舱室噪声总方框图

- (2) 通风和空调系统进、排气装置;
- (3) 机舱露天天窗;
- (4) 艏、艉兴波。

影响发动机排气噪声的主要因素是排气总管出口的声波辐射功率、排气通道、废气涡轮、排气系统火花熄灭器和消声器中的声功率损失。

通风和空调系统进、排气装置的外部噪声也是由许多因素决定的,其中一个重要因素是通风机(空调机)功率和通风管的声学性能及其长度。

与机舱露天舷窗和天窗排出的声能相关的外部噪声级取决于开口平面上舷窗和天窗前机舱的声压级、舷窗(天窗)的声功率损失以及舷窗(天窗)的数量和至船舷的距离。

对由船舶兴波引起的外部噪声研究得很少。一般认为,艏、艉兴波引起的噪声级随参数 $NB(\text{kW} \cdot \text{m})$ 的增大而增大,其中 N 为主动力装置功率, B 为船宽。

除上述主要外部空气噪声源外,影响外部大气噪声的还有螺旋桨和产生振动的机械^[2]。产生空泡时,外部大气噪声级的极大值与螺旋桨的旋转频率有关。主、辅机的振动引起船体水上部分和上层建筑外板产生声辐射,形成空气噪声。

3. 水下噪声

图 1.3 所示为影响船舶水下噪声的所有因素的方框图。因机械工作而引发的水下噪声取决于船体结构振动时的噪声辐射。除机械的空气噪声和结构噪声外,为总的水下噪声级作贡献的还有船舶系统的流体动力噪声。这种噪声在工作介质中产生,沿管路扩散,经船体进、排水孔传到环绕船舶的水中。参与形成水下噪声的不仅有同海水联通的外部系统,还有内部系统。内部系统的振动过程经各种结构、接头、吊架等引起船体振动和外部系统的流体动力噪声。系统的流体动力噪声级由泵的功率及其安装位置、工作介质流速、管路的布局 and 安装位置以及其他因素决定。下面叙述与水下噪声有关的声源。

螺旋桨造成的水下噪声主要有^[2,4]：叶片共振时辐射的噪声、边界噪声、空泡噪声。螺旋桨旋转时所产生的水下噪声主要与空泡过程有关。

船舶达到一定速度后，当叶片附近的压力减到某个阈值（一般为饱和蒸汽压力值）时，叶片上产生空泡。空泡噪声级与航速的 5~6 次幂成比例，是宽频带、无指向性的。

螺旋桨推力经轴系中的支点轴承和推力轴承作用于船体的交变力，使船体作强迫的弹性振动。当叶频及其低次谐波同船体弹性振动固有频率相吻合时，这类弹性振动的幅值特别大，此即船体共振。船体产生共振时，其辐射噪声级一般比螺旋桨的辐射噪声级大许多。

1.2 振动和噪声级限值的作用和意义

对船舶振动和噪声级提出要求有几个主要原因。造船厂要无条件地保证船员不受噪声和振动的影响，因为这种影响会引起船员不舒适和不愉快，影响他们的自我感觉、工作能力和心理稳定性，严重时导致听觉受损、睡不好觉等等，结果引发一些职业病。有关船舶噪声和振动卫生标准方面的问题，在文献[7]中作了详细阐述。强噪声环境还影响口令的接收和操管船舶所必需的其他信息的交换。

执行船舶声学特性标准还与保持空气介质中的正常噪声生态学有关。这一点涉及沿靠近住宅建筑区或休息区的航线航行的内河船和沿海船。

由于噪声和振动通过各种不同的途径作用于人体，所以往往既针对人体的活动条件，也（或）针对船上各个舱室对最大的噪声级和振动级提出要求。一般根据舱室用途将舱室分级，并为每一级舱室确定不同的噪声级。舱室分级如下：

（1）机舱。在机舱里语言交际无多大意义，主要是保护操作人员的听觉器官。

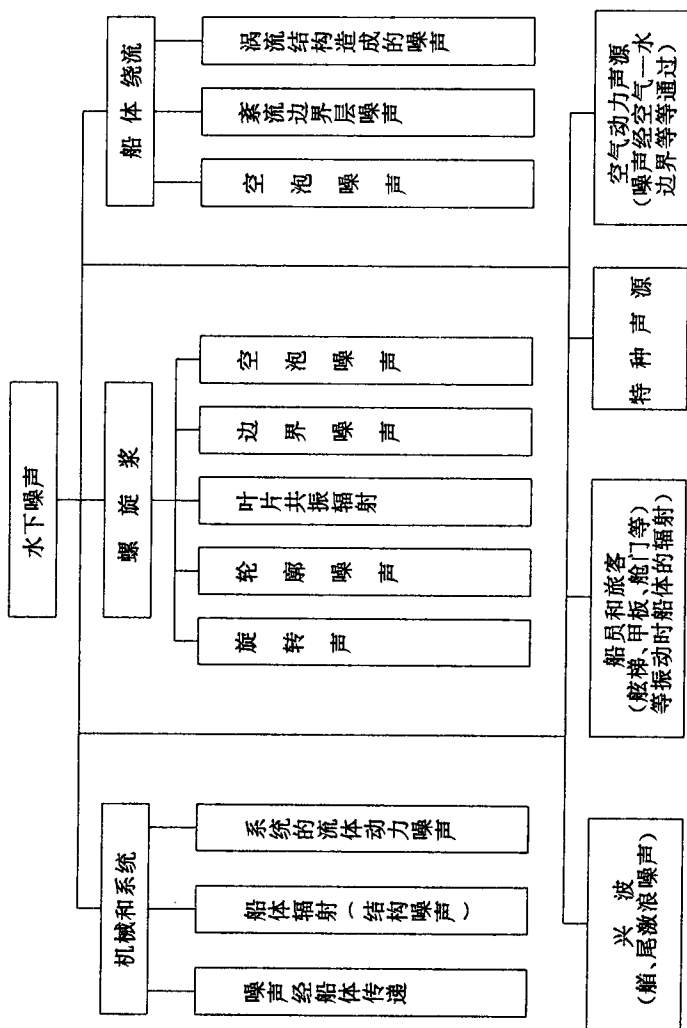


图 1.3 影响船舶水下噪声的所有因素的方框图

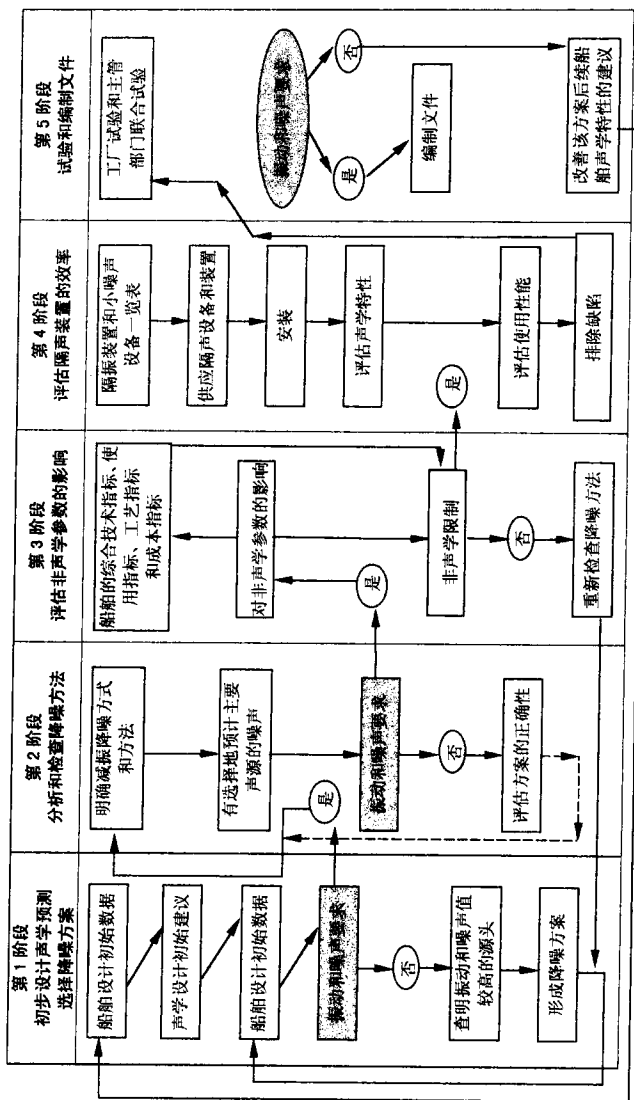


图 1.4 船舶声学设计算法