

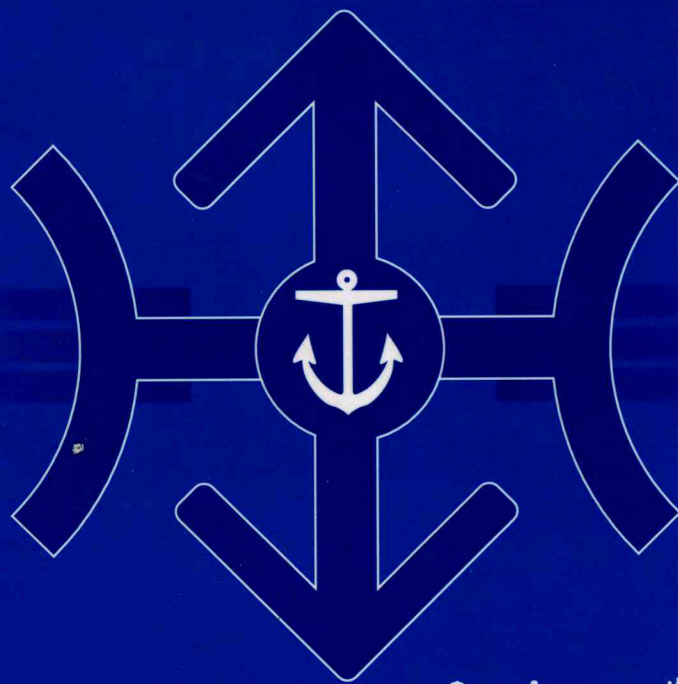
h t t p : / / w w w . n d i p . c n

《现代船舶力学》丛书

Vibration Control of Onboard Machinery

# 船舶机械振动控制

朱石坚 何琳 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

《现代船舶力学》丛书

# 船舶机械振动控制

Vibration Control of  
Onboard Machinery

朱石坚 何琳 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

船舶机械振动控制 / 朱石坚, 何琳著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 1

(现代船舶力学丛书)

ISBN 7-118-04134-3

I. 船... II. ①朱... ②何... III. 船舶机械—机械振动—振动控制 IV. U664

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 101810 号

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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

开本 710×960 1/16 印张 12¼ 216 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 46.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教

#### IV

授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

## 国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

# 《现代船舶力学》丛书 编辑委员会

名誉主任委员 黄平涛

顾问 姜来根

主任委员 吴有生

(以下按姓名笔画排序)

副主任委员 王国强 吴德铭 翁长俭 盛振邦

委员 尤子平 石仲堃 冯丹宇 许西安

刘应中 纪卓尚 杨士莪 吴秀恒

何友声 张圣坤 陈铁云 耿广生

徐秉汉 郭日修 崔维成 董世汤

彭华良 戴仰山 戴遗山

秘书 陈燮麟 赵德会 康伯霖

## 总 序

历史上蒸汽动力装置在船舶推进中的应用,改变了船舶在波浪中的航速与航线,也促进了 19 世纪中期船舶运动理论的诞生。从此,在牛顿力学的基础上,开始了船舶力学漫长的发展历程。于 20 世纪上半叶形成了自身较为系统的专业格局,并且在 20 世纪下半叶取得了突飞猛进的发展。

在 20 世纪后 40 年,随着世界经济大循环模式的形成,船舶的产量、品种大幅增长,船舶设计制造技术频频更新,改变着船舶与海上运输的面貌。21 世纪将是海洋的世纪,海洋经济、海洋开发与海洋军民装备的发展需求更将给海洋运载器技术的进步以前所未有的巨大动力。船舶力学是一个与船舶工程紧密结合的力学领域。船舶类型的每一步更新与发展,都包含着在船舶力学的领域中认识与把握船舶所遭受的随机、复杂、险恶的环境载荷,改进航行性能,保证船体安全可靠等方面的科学与技术的进步。凡是船舶力学研究最活跃的地方,往往就是需求最明确、船舶新技术出现最快的地方。可以说,现代船舶发展的历史,也就是船舶力学发展的历史,船舶力学是船舶技术创新的重要源泉之一,而船舶的工程需求又是船舶力学发展的基石,两者紧密结合,与时俱进。因此,可以预见,进入 21 世纪以后,不用太长的时间,船舶力学发展的历史必将翻到崭新的一页。

面对这样的历史机遇,有必要对世纪之交船舶力学若干主要领域的前沿内容,以及我国船舶科技工作者希望有更多了解的新内容作一些归纳与介绍。这不仅是我国广大船舶科技工作者的愿望,也有助于为进一步发展船舶力学打好基础。

20 世纪 80 年代初以来,我国的船舶工业与船舶技术取得了迅速的发展,船舶总产量在 20 世纪末已稳居世界第三位。为奠定我国船舶技术与船舶工业发展的基础,我国的船舶力学工作者含辛茹苦,摩胼胝地工作,取得了丰硕成果,有的领域接近和达到了国际先进水平。本世纪初是我国船舶工业和船舶技术跨越式发展的重要历史时期,为进一步振兴我国的船舶技术与船舶工业,有必要把所取得的成果与国际动向结合起来,作必要的提炼与总结,供我国船舶与海洋工程界科技人员和高等学校师生参考。

本着上述目的,中国造船工程学会船舶力学学术委员会及部分船舶力学工作者倡议,在世纪之交,组织国内船舶力学的专家们,集体编著一套现代船舶力学丛书。这个倡议很快得到了原国防科工委和国防科技图书出版基金委员会的赞同。



1996年成立了编委会。编委会的日常工作挂靠在中国造船工程学会船舶力学学术委员会,并在中国船舶科学研究中心的大力支持和国防科技图书出版基金委员会与国防工业出版社的指导下开展工作。

现代船舶力学丛书包括船舶水动力学、船舶结构力学、船舶设计和制造工艺中的力学问题等方面的专著。丛书注重理论与应用相结合,着眼于选题内容相对新颖与先进,并不追求覆盖范围全面与广泛。丛书内容难免会有缺陷与不足,但编委会希望在我国船舶科技界各有关院所、高校与造船企业的关怀和参加编著的专家学者的共同努力下,它的出版能够对推动我国船舶与海洋工程技术的发展,促进我国船舶工业的技术创新,以及加强中外船舶工程界的学术交流有所贡献。

吴有生

2002年9月8日

# 前 言

提高海军舰艇尤其是潜艇的声隐身性能,对增强自身作战威力与生存能力具有重要意义。在与舰艇声隐身相关的三大噪声源的控制技术中,对船用主动力装置与辅助机械振动噪声的控制占着重要的地位。关于机械振动方面的教材与专著很多,但多数阐述基础理论以及典型的多自由度系统或连续结构的振动分析方法,专门阐述船用机械振动控制技术的著作并不多见。作者长期从事舰船机械振动与噪声控制方面教学和科研工作,并且在实船应用方面也积累了丰富的实践经验。本书即在作者多年研究成果的基础上,针对船舶机械噪声源控制所特别关注的问题,结合国内外发展与应用的主要技术、值得注意的新技术编著而成。希望本书能对我国舰艇声隐身技术水平的提高发挥积极的促进作用。

本书有如下特点:① 并未涉及振动学的各个方面,而是集中论述,并力求突出重点地说明船舶机械振动噪声控制的有关问题;② 内容包括了国内主要是作者的研究成果,如振动控制评价指标与方法(澄清了工程界广为应用但互不统一的多种隔振效果评估方法的合理性及相互之间的本质关系)、隔振器性能的测量(特别是隔振器机械阻抗的测量)、振源设备激励谱估计等;③ 紧密结合工程实际,如针对船用情况介绍了船用隔振器(船用钢丝绳隔振器和空气弹簧)与船用阻尼材料的理论与应用设计技术;④ 注重了新技术内容,包括浮筏隔振系统的功率流传递特性、振动主动控制技术及混沌隔振技术。

全书共分八章。第一章概述了舰船水声隐身的意义和船舶机械振动对舰船水声隐身性能的影响;第二章阐述了单层隔振系统的初步设计和技术设计、双层隔振系统的设计原则、隔振效果的评估方法及相互之间的本质关系;第三章分析了复杂隔振系统功率流传递特性;第四章阐述了振源设备激励谱估计方法;第五章介绍了隔振器的基本性能指标与测定、船用钢丝绳隔振器和空气弹簧的特性和设计;第六章内容包括阻尼减振原理、表面阻尼处理的理论与设计、船舶上使用的吸振阻尼材料以及吸振结构振动过程的一般数学描述方法;第七章介绍了振动主动控制技术;

第八章针对线谱在舰艇水声隐身中的危害提出了混沌隔振方法。

楼京俊、何其伟、翁雪涛、陈刚、毛为民、刘树勇、俞翔、张振中及章林柯等博士生阅读了本书稿的部分章节,提出了许多宝贵意见,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,书中缺点错误与不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2005年5月于武汉

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了船舶动力机械振动控制理论与技术,内容包括:单双层隔振的设计与分析方法、浮筏隔振的功率流传递与控制、多种隔振评估指标与方法间的联系与本质差别、振源设备激励谱估计、隔振器的性能测定和设计、船用阻尼的应用设计、振动主动控制理论与应用、混沌隔振理论等。

本书供相关专业的研究生、教师,从事船舶设计研究的人员和相关专业的研究人员使用。

The fundamentals and techniques in vibration control of onboard machinery are presented systematically, including the design and analysis method about single and double-stage vibration isolation systems, the transmission characteristics and control of power flow in raft vibration isolation system, the relationship and substantial distinction among different performance assessment indices, the estimation of excitation spectrum of vibration source machinery, the characterization and design of isolators, the application and design of damping materials on ships, the theory and application of active vibration control, and the theory and application of chaotic vibration isolation system on elimination of line spectrum, etc.

This book can be referenced by graduate students, professors of ship mechanics, the ship design researchers and the related specialities.

# 目 录

第一章 概论	1
1.1 船舶水声隐身的意义	1
1.1.1 水声隐身	1
1.1.2 水声辐射对水声探测的影响	2
1.2 船舶机械振动对船舶水声隐身性能的影响	3
1.2.1 水噪声的主要来源	3
1.2.2 船舶振动控制的不同要求	4
1.2.3 降低机械噪声的措施	4
参考文献	5
第二章 隔振装置设计及隔振效果评估	6
2.1 单层隔振系统	6
2.1.1 单自由度振动系统	6
2.1.2 6自由度线性振动系统	9
2.1.3 单层隔振系统在隔离结构噪声时的局限性	13
2.2 双层隔振系统	17
2.3 隔振效果评估	24
2.3.1 力传递率	25
2.3.2 插入损失	26
2.3.3 振级落差	27
2.3.4 各评估指标之间的关系	28
2.3.5 振动烈度	32
参考文献	34
第三章 复杂隔振系统功率流传递特性	35
3.1 6自由度机器—柔性基础耦合系统的功率流传递特性	36
3.1.1 分析模型	36
3.1.2 系统动态状态空间的完备描述	36
3.1.3 系统结构参量矩阵	37
3.1.4 导纳分析	40

3.1.5	传递功率流函数 .....	41
3.1.6	功率流传递率 .....	43
3.1.7	传递功率流落差函数 .....	44
3.2	SS薄板基础上单层隔振系统的功率流传递特性 .....	45
3.2.1	分析模型 .....	45
3.2.2	计算变量和参量矩阵 .....	46
3.2.3	功率流传递率与功率流传递落差分析 .....	49
3.3	浮筏隔振系统的功率流传递特性 .....	52
3.3.1	基本理论推广 .....	53
3.3.2	浮筏系统力学模型 .....	54
3.3.3	功率流传递函数推导 .....	55
3.3.4	系统功率流传递特性分析及其控制 .....	59
	参考文献 .....	64
<b>第四章</b>	<b>振源设备激励谱估计 .....</b>	<b>65</b>
4.1	激励源频谱估计的理论方法 .....	66
4.1.1	一般原理方法 .....	66
4.1.2	系统激励特性方程 .....	67
4.1.3	基本方法的应用范围及推广 .....	69
4.2	激励谱估计实验研究 .....	70
4.2.1	实验系统 .....	70
4.2.2	实验数据处理程序 .....	71
4.2.3	激励谱等效估计方法的可信度 .....	73
4.2.4	工程实际中的激励谱估计 .....	75
	参考文献 .....	77
<b>第五章</b>	<b>隔振器及其特性 .....</b>	<b>78</b>
5.1	隔振器的基本性能指标与测定 .....	78
5.1.1	静刚度 .....	78
5.1.2	动刚度 .....	78
5.1.3	阻尼 .....	79
5.2	隔振器的机械阻抗 .....	83
5.2.1	机械阻抗理论计算 .....	84
5.2.2	机械阻抗的测定 .....	86
5.3	隔振器的种类及其特性 .....	88
5.3.1	钢丝绳隔振器 .....	89
5.3.2	空气弹簧 .....	92

参考文献	102
<b>第六章 阻尼减振技术</b>	<b>103</b>
6.1 阻尼减振原理	103
6.2 阻尼的产生机理	105
6.2.1 工程材料的内阻尼	105
6.2.2 库仑阻尼	106
6.2.3 流体的粘滞阻尼	107
6.2.4 冲击阻尼	108
6.2.5 磁电效应阻尼	108
6.3 阻尼材料的性能评估指标与影响因素	108
6.3.1 阻尼材料的能量损耗与评估指标	108
6.3.2 影响阻尼材料性能的因素	109
6.4 表面阻尼处理的理论与设计	110
6.4.1 表面阻尼处理的类型及分析方法	110
6.4.2 自由阻尼处理结构的损耗因子与弯曲刚度	111
6.4.3 约束阻尼处理结构的损耗因子	113
6.5 船舶上使用的吸振阻尼材料	114
6.5.1 粘弹性阻尼材料	114
6.5.2 沥青型阻尼材料	115
6.5.3 复合吸振材料	115
6.5.4 阻尼涂料	117
6.5.5 阻尼合金	120
6.6 吸振结构振动过程的一般数学描述方法	121
6.6.1 用复固有振型分析复杂结构的振动性能	121
6.6.2 表征吸收振动能的诸物理量间的相互关系	124
参考文献	131
<b>第七章 振动主动控制技术</b>	<b>132</b>
7.1 振动主动控制概述	132
7.2 作动器	134
7.2.1 伺服气垫作动器	135
7.2.2 电液伺服作动器	136
7.2.3 电磁式作动器	137
7.2.4 空气弹簧作动器	138
7.2.5 压电材料作动器	140
7.2.6 磁致伸缩材料作动器	141

7.2.7	形状记忆材料作动器 .....	142
7.2.8	电流变体 .....	144
7.2.9	磁流变体 .....	145
7.3	控制律设计方法 .....	146
7.3.1	特征结构配置 .....	146
7.3.2	模态控制 .....	147
7.3.3	PID 控制 .....	147
7.3.4	最优控制 .....	148
7.3.5	自适应控制 .....	149
7.3.6	模糊控制 .....	150
7.3.7	神经网络控制 .....	150
7.4	振动主动控制的应用 .....	151
7.4.1	主动减振 .....	151
7.4.2	主动隔振 .....	152
7.4.3	主动吸振 .....	155
	参考文献 .....	158
<b>第八章</b>	<b>混沌隔振技术</b> .....	<b>160</b>
8.1	引言 .....	160
8.2	非线性隔振系统的动力学分析 .....	161
8.2.1	非线性隔振系统模型 .....	161
8.2.2	Holmes 型 Duffing 系统 .....	162
8.2.3	硬弹簧 Duffing 系统 .....	165
8.3	通向混沌的道路及功率谱的标度性 .....	167
8.4	混沌隔振性能评价指标 .....	171
8.5	实验 .....	172
	参考文献 .....	174



# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Significance of marine hydroacoustic stealth .....	1
1.1.1 Hydroacoustic stealth .....	1
1.1.2 Affection of radiated noise on acoustic detectability and detectivity .....	2
1.2 Affection of mechanical vibration on marine hydroacoustic stealth .....	3
1.2.1 Main sources of radiated noise .....	3
1.2.2 Vibration control demands .....	4
1.2.3 Noise control measures .....	4
References .....	5
<b>Chapter 2 Design of isolation mounting and evaluation of effectiveness</b> .....	6
2.1 Single-stage vibration isolation system .....	6
2.1.1 Single-degree-of-freedom linear system .....	6
2.1.2 Six-degree-of-freedom linear system .....	9
2.1.3 Limitation of single-stage vibration isolation system .....	13
2.2 Double-stage vibration isolation system .....	17
2.3 Evaluation of isolation effectiveness .....	24
2.3.1 Force transmissibility .....	25
2.3.2 Insertion loss .....	26
2.3.3 Vibration level difference .....	27
2.3.4 Relationship among assessment indices .....	28
2.3.5 Vibration severity .....	32
References .....	34
<b>Chapter 3 Transmission characteristics of power flow in complex system</b> .....	35
3.1 Power flow transmission in six-degree-of-freedom coupled system between machine and flexible base .....	36
3.1.1 Analytical model .....	36
3.1.2 Complete description of dynamic state space .....	36