



国防科技图书出版基金

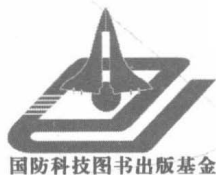
Line Spectra Chaotification for Vibration
Isolation System of Onboard Machinery

舰船机械隔振系统 线谱混沌化控制

朱石坚 徐道临 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



舰船机械隔振系统线谱 混沌化控制

Line Spectra Chaotification for Vibration Isolation
System of Onboard Machinery

朱石坚 徐道临 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

舰船机械隔振系统线谱混沌化控制 / 朱石坚, 徐道临著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 8

ISBN 978 - 7 - 118 - 09745 - 0

I. ①舰... II. ①朱... ②徐... III. ①船舶机械-隔振技术 IV. ①U664

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 243476 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 255 千字

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

序

党的十八大提出了“提高海洋资源开发能力,坚决维护国家海洋权益,建设海洋强国”的战略目标。习近平总书记指出,“建设海洋强国必须大力发展海洋高新技术”“坚持有所为有所不为,重点在深水、绿色、安全的海洋高技术领域取得突破。”在当今世界军事格局中,为确保我国的海洋安全,我国的海军必须具有能应对严峻挑战的纵深海域制海能力;海军装备必须具备覆盖浅水与深海,跨越近岸与远洋,适应蓝色海军使命任务的生命力和战斗力。因此,发展海军装备新技术是当今中国科技人员应尽的责任。

潜艇以其隐蔽性和突然打击能力成为海军装备体系中最重要战略与战术力量之一。在声、红外、电磁、尾流等诸物理场中,唯有声波能在海水中远距离传播,随着现代声纳技术的发展,成为暴露潜艇行踪的主要信号。近40余年来,西方海军强国投入了大量人力、物力和财力,发展潜艇的声隐身技术,于20世纪70年代实现了核潜艇的准安静化,90年代实现了核潜艇的安静化。在声隐身技术中,一个重要的内容是降低机械设备周期性运转产生的低频线谱。这类低频线谱的能量稳定而集中,增加了潜艇的可探测性;同时,每艘潜艇辐射噪声线谱的特征具有指纹一样的高可辨识性,成为被反潜声纳探测、跟踪和识别的主要信号。因此,降低低频机械噪声线谱强度,是潜艇声隐身技术领域最重要的问题之一,受到了广泛的关注。针对该问题,本书作者基于长年从事舰船机械振动噪声控制技术研究的实践经验,提出了舰船机械隔振系统线谱混沌化控制方法。该方法利用混沌系统所具备的“线谱输入、宽频连续谱输出”的特性,通过对舰船机械隔振系统实施混沌化控制,实现对水下辐射噪声的频谱重构,改变线谱特征信息,为潜艇水下辐射噪声线谱控制开辟了新的方向。

本书凝聚了作者团队多年潜心研究线谱混沌化控制方法的有关成果。主要有两方面的内容:一是发展混沌化控制方法,重点解决线谱重构问题,以达隐蔽

潜艇机械系统振动噪声的线谱特征之目的;二是利用准零刚度隔振装置和小能量混沌化控制,重点解决线谱削减的技术问题,实现低频隔振之目的。一旦将混沌化技术与“准零刚度系统”相结合,即呈现出在较宽的频率范围内实现显著的线谱控制效果的可能性。本书归纳的这些工作不仅在理论上形成了体系,且有明确的工程应用前景,是振动噪声控制领域中一部创新性甚强的专著。随着研究的深入开展,相信有关技术会逐渐完善,并走向工程实用。本书的出版对推动我国振动噪声控制技术的研究和混沌理论在舰船工程领域的应用具有重要的意义。

吴有生

二〇一四年八月一日

前言

“辐射噪声”和“线谱”或许是潜艇声隐身领域研究人员及潜艇部队官兵相互交流中出现频次最高的两个词。自 1915 年声纳首次投入实战以来,特别是第二次世界大战后期声纳性能得到显著改善后,潜艇便结束了“为所欲为”的日子,不得不“谨小慎微”起来。其主要原因便是潜艇水下辐射噪声成为了声纳系统的捕捉信号,可用于搜索、定位、测速和识别,这直接危害到潜艇的安全和制约战斗力发挥。第二次世界大战结束后的 60 余年里,潜艇振动噪声控制领域的专家学者和工程技术人员殚精竭虑,从基础理论开始,到试验验证、工程设计、实艇应用,不遗余力地降低着潜艇的水下辐射噪声,取得了显著的成果。例如:美国攻击型核潜艇的辐射噪声从 1955 年的 170dB 下降到 1995 年的 120dB,平均每年下降约 1.25dB;苏联从 1960 年的 165dB 下降到 1995 年的 130dB,平均每年下降约 1dB,略低于美国。随着潜艇辐射噪声的降低,声纳的探测能力也在逐年提高,特别是随着声纳对线谱检测能力的发展,另一个关乎潜艇安全的“幽灵”又浮出了水面,即辐射噪声频谱中低频段的线谱。

潜艇水下辐射噪声中的线谱成分所特有的集中而稳定的能量不仅增加了潜艇的可探测性,而且线谱本身携带的频率信息也是水声探测设备进行目标参数估计和类型识别的重要依据。例如,精密测定线谱的多普勒频移并实行跟踪,可有效估计目标舰船的运动参数。线谱一般集中在低频段,而低频噪声在水中传播得更远。此外,辐射噪声中的线谱分布对每一艘潜艇来说,就如同人的指纹一样是一定的。正是由于线谱对潜艇声隐身性能直接而又显著的危害,各国学者开始关注如何降低线谱强度,隐藏线谱所携带的有关潜艇的信息。但令人遗憾的是,在线谱控制方面所取得的成效并不明显,多年过去了,线谱依然突兀在潜艇水下辐射噪声频谱之中。

潜艇水下辐射噪声中低频段的线谱主要是由动力机械振动引起的,传统的

振动噪声控制方法却似乎对消除线谱无效,这究竟是何原因?这一问题长期困扰着我们团队。从 1995 年开始,我们持续关注混沌现象,在阅读并翻译了大量英文文献后,一个想法逐渐明晰。传统的隔离潜艇动力机械振动的隔振装置均基于线性系统理论,所设计的线性隔振系统具有频率保持性,无法改变系统响应的频谱结构。潜艇动力设备多为旋转或往复机械,激励谱中必然存在诸多与运转周期相关的高强度线谱,通过线性系统的层层传递,虽历经变换和相互作用,但仍然形成了水下辐射噪声的线谱成分。即便是弱非线性系统,也无非是在线谱激励的倍频处增加一些线谱成分而已。而若设计强非线性隔振系统,并通过施加适当控制,使系统处于持续的混沌运动状态,此时混沌系统具有线谱输入、宽频连续谱输出的特性,可实现频谱重构,有效削弱线谱特征,隐匿线谱携带的信息,这便是机械隔振系统线谱混沌化控制方法。

自提出线谱混沌化控制以来,我们从线谱混沌化原理、多频激励非线性系统混沌化、分段线性系统混沌化、高维系统混沌化、混沌信号识别、离散脉冲混沌化、混沌同步控制等方向开展了深入研究。2010 年,湖南大学徐道临教授加盟线谱混沌化控制研究团队,在徐教授及其团队卓有成效工作下,我们又在时延反馈混沌化、线谱优化控制、准零刚度隔振装置、高维准零刚度隔振系统混沌化控制等方面取得了诸多创新性成果。逐步解决了大参数范围混沌化、小能量控制、混沌化品质改善、变参数条件下的持续混沌化等与应用技术密切相关的理论问题。目前,从控制方法到试验验证,从高效低频隔振装置研制到技术实现,线谱混沌化控制方法理论体系和相关技术正在逐渐完善,并稳步迈向工程应用。

我们欣喜地发现,线谱混沌化控制方法得到了国内同行的广泛认可,先后得到了 6 项国家自然科学基金、1 项教育部优秀博士学位论文作者专项基金、1 项 985 专项基金、2 项总装备部预研基金支持。在该研究领域,两篇博士论文《基于混沌理论的线谱控制技术研究》和《非线性隔振系统动力学特性与混沌反控制研究》分获 2009 年、2011 年全国优秀博士论文;共 30 余篇论文被 SCI 收录;获 4 项国家专利。

本书内容包括了线谱混沌化控制技术近年来的最新研究成果。针对水下辐射噪声频谱重构这一主题,阐述了线谱混沌化控制方法和基于准零刚度系统的

低频隔振技术。前者是线谱改造的技术手段,后者是降低线谱强度和发挥混沌化效能的利器,通过两者技术融合,在准零刚度系统上实现高品质混沌化。全书共分为10章:第1章为绪论,概述了舰船水声隐身的意义和经典隔振理论对线谱控制的局限;第2章介绍线谱混沌化控制的理论基础,即混沌基本特征与混沌化控制方法等;第3章阐述利用线谱混沌化控制来实现频谱重构的原理;第4章讨论将隔振系统离散化后,利用离散脉冲控制来实现系统混沌化的方法;第5章研究混沌同步化线谱控制方法,并对混沌同步的多稳定同步流形进行理论分析;第6章分析线性和非线性时延控制在线谱混沌化控制中的应用;第7章提出最优时延反馈混沌化方法,并通过数值仿真和试验研究验证了其有效性;第8章为准零刚度隔振系统的概念、原理、动力学特性,并设计了几类不同新型准零刚度隔振器,是实现高品质混沌化的系统平台;第9章建立准零刚度浮筏隔振系统,并利用最优时延反馈方法实现其混沌化,从而改善和重构系统线谱特征;第10章对线谱混沌化控制技术进行综合评述,并提出进一步深化研究的方向和对该项整体技术的展望。

从利用混沌特性来控制潜艇水下辐射噪声中线谱成分的想法形成之初,中国舰船重工集团公司第702研究所吴有生院士便给予了热情鼓励和精心指导,正是这份鼓励和支持,才使得我们有勇气将线谱混沌化控制研究坚持下来,并推向工程应用。对吴院士的关心、鼓励和指导,我们表示由衷的敬意。

本书是在海军工程大学和湖南大学两个研究团队的主要研究成果基础上形成的。海军工程大学研究团队中,姜荣俊博士、楼京俊博士、何其伟博士、俞翔博士、刘树勇博士、张振海博士、曾强洪博士、李志兴博士、杨庆超博士,湖南大学研究团队中,李盈利讲师、周加喜副教授、张敬博士等进行了大量的专题和相关技术研究,他们团结协作、刻苦钻研,取得了许多创新性成果,为丰富本书内容提供了新颖题材,在此向他们表示深切的感谢。

混沌的应用研究方兴未艾,新的研究成果不断出现,日臻丰硕。由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评和指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 舰船水下辐射噪声及其危害	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 舰船水下辐射噪声组成及特征	4
1.2.1 水下辐射噪声的主要来源	4
1.2.2 水下辐射噪声的频谱特性	5
1.3 舰船机械噪声振动控制	9
1.3.1 水下辐射噪声控制要求和方法	9
1.3.2 经典隔振理论及其局限	10
1.4 基于线谱混沌化的频谱重构	13
参考文献	16
第2章 非线性系统混沌化	19
2.1 混沌的特征	19
2.2 混沌的定义	22
2.2.1 Li-Yorke 混沌	22
2.2.2 Devaney 混沌	23
2.3 混沌的数值判据与识别	23
2.3.1 Lyapunov 指数	24
2.3.2 修正的 Poincaré 截面法	25
2.3.3 混沌信号的小波包能量特征	27
2.3.4 混沌信号的递归图特征	30
2.3.5 混沌振动离线识别流程	31
2.3.6 混沌振动在线监测方法	33
2.4 混沌化控制方法	35
2.4.1 混沌控制与混沌化控制	35

2.4.2	离散时间系统	36
2.4.3	连续时间系统	38
	参考文献	40
第3章	线谱混沌化频谱重构原理	42
3.1	隔振系统建模	42
3.2	硬弹簧 Duffing 振子的动力学特性与混沌机理	43
3.2.1	范德波尔平面分析	43
3.2.2	胞映射分析	45
3.2.3	混沌运动的演化分析	47
3.3	倍周期分岔过程功率谱的标度性	51
3.4	混沌运动的功率谱特性	53
3.5	线谱混沌化控制的基本思想	54
3.6	线谱混沌化的困难与挑战	55
	参考文献	56
第4章	离散脉冲混沌化线谱控制	59
4.1	连续时间系统的离散化	59
4.1.1	单自由度系统离散化	60
4.1.2	多自由度系统离散化	63
4.2	离散系统混沌化原理	67
4.2.1	单自由度系统的混沌化	67
4.2.2	多自由度系统的混沌化	68
4.3	基于 Lyapunov 指数的控制器设计	69
4.3.1	单自由度线性系统控制器设计	69
4.3.2	多自由度线性系统控制器设计	73
4.4	数值分析	75
4.4.1	时间历程与功率谱	77
4.4.2	相图分析	79
4.4.3	频谱结构分析	79
	参考文献	80
第5章	混沌同步化线谱控制	82
5.1	混沌同步化原理	82

5.2	参数驱动控制方法	83
5.2.1	基本方程	84
5.2.2	控制方法	86
5.2.3	稳定性分析	88
5.3	状态驱动控制方法	90
5.3.1	控制方法	91
5.3.2	稳定性分析	93
5.4	多稳定同步流形	93
5.4.1	同步流形的多值性	94
5.4.2	同步流形的稳定性条件	95
5.4.3	耦合 Duffing 系统分析	98
	参考文献	101
第 6 章	时延反馈混沌化控制	104
6.1	时延系统的高维度特性	104
6.2	时延系统的稳定性分析	105
6.2.1	单层隔振系统的稳定性条件	105
6.2.2	控制增益与系统刚度的关系	108
6.3	线性时延反馈混沌化控制	110
6.3.1	浮筏隔振系统的稳定性	110
6.3.2	控制参数对混沌化的影响	120
6.4	非线性时延反馈混沌化控制	122
6.4.1	非线性系统的精确线性化	122
6.4.2	标准型线性系统时延反馈混沌化	125
6.4.3	浮筏隔振系统的非线性时延控制器	127
6.5	非线性时延混沌化分析与讨论	130
6.5.1	反馈控制增益对线谱的影响	130
6.5.2	控制时延变化的影响	133
6.5.3	反馈频率变化的影响	134
	参考文献	135
第 7 章	优化时延反馈混沌化控制	137
7.1	基于线谱特征的目标函数设计	137

7.1.1	时延反馈控制器设计	137
7.1.2	线谱特征目标函数设计	139
7.1.3	线谱特征指标函数验证	140
7.2	优化时延反馈混沌化方法	142
7.3	大参数范围的线谱混沌化控制	144
7.3.1	数值仿真	144
7.3.2	实验验证	147
7.4	实时优化时延反馈混沌化控制	148
7.4.1	控制策略	148
7.4.2	数值算例	150
	参考文献	152
第8章	准零刚度隔振系统及动力学特性	154
8.1	准零刚度概念	154
8.2	几类准零刚度隔振器设计及刚度特性	156
8.2.1	磁力弹簧准零刚度隔振器	156
8.2.2	碟形准零刚度隔振器	163
8.2.3	屈曲板准零刚度隔振器	165
8.2.4	滚球型准零刚度隔振器	167
8.3	准零刚度系统的隔振特性	170
8.3.1	幅频曲线及跳跃频率	170
8.3.2	力传递率	173
8.4	实验研究	175
8.4.1	实验装置	175
8.4.2	实验结果	176
	参考文献	178
第9章	准零刚度浮筏隔振系统混沌化控制	180
9.1	准零刚度浮筏隔振系统设计	180
9.2	简化模型的动力学特性	181
9.2.1	模型简化	182
9.2.2	隔振性能	186
9.3	准零刚度浮筏隔振系统动力学方程	187

9.4 隔振特性分析	192
9.5 频谱重构	195
参考文献	199
第 10 章 线谱混沌化控制综合评述与展望	201
10.1 混沌化方法综述	201
10.2 大参数范围混沌化	202
10.3 小能量控制	204
10.4 混沌品质的改善	206
10.5 变参数持续混沌化	208
10.6 准零刚度系统与混沌化结合	209
10.7 技术发展方向与展望	210
参考文献	211

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Radiated noise and its hazards	1
1.1.1 Hydroacoustic stealth	1
1.1.2 Influence of waterborne radiated noise on hydroacoustic signal detection	2
1.2 Composition of waterborne radiated noise and its characteristics	4
1.2.1 Main sources of radiated noise	4
1.2.2 Spectral features of radiated noise	5
1.3 Control on machinery vibration and noise	9
1.3.1 Requirements and methods in controlling radiated noise	9
1.3.2 Classical vibration isolation theory and its limitations	10
1.4 Spectral reconstruction based on line spectra chaotification	13
References	16
Chapter 2 Chaotification of nonlinear systems	19
2.1 Characteristics of chaos	19
2.2 Definition of chaos	22
2.2.1 Li-Yorke chaos	22
2.2.2 Devaney chaos	23
2.3 Criterion and recognition of chaos	23
2.3.1 Lyapunov Exponents	24
2.3.2 Modified Poincaré sectional method	25
2.3.3 Wavelet packeted energy characteristic of chaotic signals	27
2.3.4 Recursive features of chaotic signals	30
2.3.5 Offline recognition of chaotic vibration	31
2.3.6 Online recognition of chaotic vibration	33
2.4 Methodology for chaotification	35
2.4.1 Chaos control and chaotification	35