



船舶振动噪声预报 与结构声学设计

Vibration and Noise Prediction and
Structural Acoustic Design of Ship

› 温华兵 著 ‹



国防工业出版社

National Defense Industry Press

船舶振动噪声预报与 结构声学设计

温华兵 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书紧密结合工程实际,系统介绍船体结构声学预报方法与控制技术。首先,分别介绍船体结构低频、中频与高频声振性能数值分析方法及若干应用实例。其次,开展了加筋薄壳结构与夹层结构的振动声辐射水平与隔声性能分析,探讨了空心与实心结构对薄壳结构的质量阻振性能;介绍了薄壳结构的粘弹性阻尼减振机理,探讨新型丁基橡胶复合阻尼减振胶板对板筋结构、基座结构和船体结构的减振效果,研究了船体结构的阻尼减振设计技术。然后,结合数值分析与实验研究,介绍舱段内基座结构的振动模态与传递特性,探讨基座结构对振动传递特性的影响,分析舱段内基座结构的质量阻振和阻尼减振效果,给出基座结构的阻尼—质量复合阻振技术。最后,给出了船舶结构声学设计基本原则,以某舰艇和鱼雷为实例介绍船体结构声学预报与设计技术。

本书可作为从事船体结构声学预报、声学设计及控制技术研究科研人员和设计人员的参考资料,也可作为船舶与海洋工程等相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶振动噪声预报与结构声学设计/温华兵著. —北京:
国防工业出版社, 2015. 10
ISBN 978 - 7 - 118 - 10411 - 0

I. ①船… II. ①温… III. ①船体结构—声学—设计
IV. ①U663. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 218451 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 22 字数 394 千字
2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

提高海军舰艇声隐身性能,特别是潜艇对增强自身作战威力与生存能力有重要意义。在与舰艇声隐身相关的三大噪声源的控制技术中,对船用主动装置与辅助机械振动噪声的控制占有重要的地位。在民用方面,随着舒适性要求的提高,人们对船舶舱室振动噪声的要求也越来越高,工程设计人员迫切需要掌握船舶振动噪声预报技术和舱室减振降噪设计技术。关于机械振动方面的教材和专著很多,朱石坚、何琳、汪玉等还撰写了专门阐述船用机械振动控制技术的著作。但是系统论述船舶振动噪声预报与结构声学设计的著作很少,本书的出版目的是:在给出船舶振动噪声数值预报方法并结合船舶声学预报技术,从而进行探讨船体结构,尤其是设备支撑基座结构的声学设计技术。

因机械设备的振动所导致的船体振动及其声辐射,一直是舰船声隐身领域关注的重点之一。船体结构声学设计是实现舰船声隐身的前提,在设计阶段就能对未来舰船的声学性能作出较为准确的预报,这对正在进行的舰船结构设计有着重要的指导意义。所以,本书分别介绍了船体结构低频、中频与高频声振性能数值分析方法,并给出了若干舰船的声学性能预报应用实例,这将对船舶振动噪声预报水平的提高发挥积极的促进作用。

船体及其支撑结构参数是影响船体结构水下声辐射和舱室噪声的关键。通过研究这些参数对船体结构声振性能的影响,将为船体结构声学设计提供基础。基座结构是动力机械固定于船体的基础,在承载设备重量的同时将振动传递到船体。它的传递特性直接影响到船体的水下辐射噪声和舱室内部噪声,所以对基座的传递特性研究受到国内外的普遍重视。与船体结构声学设计相比,基座结构的声学设计在工程实践中更容易被采纳并加以应用。因此,关于基座结构的声学设计,将作为本书的研究重点。

全书共分为 10 章。第 1 章概述了薄壳结构的声振性能数值分析方法、薄壳结构阻尼减振技术、质量阻振技术的现状与发展和舰船结构声学设计;第 2 章介绍了薄壳结构声振性能的低频有限元法、边界元法、高频统计能量法和中频混合法等数值分析方法,给出了若干船舶的低频、中频与高频声学性能预报应用实例;第 3 章给出了薄壳板筋与夹层板结构的声学性能数值分析实例,可供薄壳板筋结构的声学设计提供参考;第 4 章提出了一种空心阻振结构,对比

分析了空心阻振结构与实心阻振结构的阻振性能,发展了薄壳结构的质量阻振技术;第5章介绍了粘弹性阻尼材料的减振机理,探讨了复合阻尼减振胶板对船体结构的阻尼减振降噪性能;第6章介绍了基于结构振动模态的振动传递理论,开展了舱段内基座结构的振动传递特性数值分析,探讨了内部基座结构参数对结构振动传递特性的影响;第7章设计了舱段内部具有多个动力设备支撑基座的圆柱壳体实验装置,通过实验分析了基座的型式、结构参数及布置对圆柱壳体模型传递特性的影响;第8章开展了圆柱壳体模型支撑结构的质量阻振与阻尼减振性能研究,提出了基座结构的质量-阻尼复合阻振技术;第9章介绍了船舶舱室噪声简易估算方法,论述了船体结构声学设计基本准则,结合船舶声学预报技术探讨船体结构尤其是设备支撑基座结构的声学设计技术,介绍了船体水下辐射噪声预报程序的二次开发方法;第10章开展了鱼雷动力系统至壳体结构的振动传递特性及控制技术研究,探讨了鱼雷结构与动力系统的声学设计技术。

本书的编写以江苏科技大学振动噪声研究所多年来的应用基础研究成果为基础。硕士研究生彭子龙、刘甄真、刘林波、仇远旺、胡玉超、唐曾艳和王康乐等人参与了研究工作,为本书的撰写提供了许多有用的素材,同时本书的撰写还得到了王国治教授、左言言教授的大力支持,郭俊华参与了书稿的校对工作,在此表示感谢!

由于笔者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2015年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 薄壳结构声振性能数值方法概述	3
1.2.1 中频组合系统	3
1.2.2 低频确定性分析方法	4
1.2.3 高频统计性分析方法	5
1.2.4 中频混合分析法	8
1.3 薄壳结构阻尼减振技术概述	11
1.4 薄壳结构质量阻振技术概述	12
1.5 舰船结构声学设计概述	13
第 2 章 船体结构声振性能数值分析方法及应用	15
2.1 船体结构低频振动有限元分析	16
2.1.1 结构振动有限元方法	16
2.1.2 船体结构振动的有限元建模	18
2.1.3 结构灵敏度分析的有限元模型修正方法	21
2.1.4 舱段结构有限元模型修正应用	25
2.1.5 鱼雷模型结构振动模态 FEM 分析实例	27
2.1.6 拖轮船体结构振动特性 FEM 分析实例	28
2.2 船体结构低频辐射噪声边界元分析	36
2.2.1 结构声辐射边界元方法	36
2.2.2 有限元/边界元法分析步骤	38
2.2.3 船体结构辐射噪声 BEM 分析实例	39
2.3 船体结构声振性能高频统计性分析方法	46
2.3.1 统计能量分析法	46
2.3.2 统计能量法分析步骤	54
2.3.3 单双层玻璃窗隔声 SEA 分析实例	55
2.3.4 拖轮舱室噪声 SEA 分析与声学设计实例	61
2.4 船体结构声振性能中频混合法分析	72

2.4.1	FE-SEA 混合分析方法	72
2.4.2	随机子系统的能量响应的推导过程	76
2.4.3	FE-SEA 混合法计算流程	81
2.4.4	FE-SEA 混合法频率区间划分准则	82
2.4.5	双层圆柱结构声振性能 FE-SEA 分析实例	88
2.4.6	拖轮舱室噪声特性 FE-SEA 分析实例	91
2.5	本章小结	97
第3章	板筋结构声学性能数值分析	98
3.1	板结构声辐射特性理论	98
3.2	加筋板结构声振性能数值分析	100
3.3	夹层板结构声振性能数值分析	104
3.4	加筋方向对结构声振性能的影响	106
3.5	无筋板结构隔声性能数值分析	110
3.6	单层板筋结构隔声性能数值分析	112
3.7	双层板筋结构隔声性能数值分析	119
3.8	本章小结	122
第4章	薄壳结构振动传递的质量阻振设计	124
4.1	平板结构质量阻振性能波动法分析	124
4.1.1	质量阻振机理波动法分析	124
4.1.2	实心结构质量阻振性能分析	127
4.1.3	空心结构质量阻振性能分析	130
4.2	平板结构的质量阻振性能数值分析	133
4.3	平板结构的质量阻振性能实验验证	134
4.3.1	阻振性能实验方案	134
4.3.2	阻振性能实验结果分析	135
4.4	L形板结构的质量阻振性能数值分析	141
4.5	本章小结	150
第5章	船体结构的粘弹性阻尼减振设计	152
5.1	粘弹性阻尼材料减振机理	152
5.1.1	阻尼减振原理	152
5.1.2	粘弹性材料的基本性质	154
5.1.3	粘弹性材料的本构关系	155
5.1.4	结构损耗因子	156
5.2	丁基橡胶复合阻尼减振胶板	157

5.2.1 丁基橡胶复合材料制备工艺	158
5.2.2 复合阻尼减振胶板性能	160
5.3 板筋结构阻尼减振性能实验分析	161
5.4 基座结构的阻尼减振性能实验分析	165
5.5 船体结构模型阻尼减振性能实验分析	171
5.5.1 结构振动模态实验	172
5.5.2 阻尼减振性能实验	174
5.6 本章小结	176
第6章 舱段内基座结构的振动传递特性数值分析	178
6.1 基于结构振动模态的振动传递理论	178
6.2 舱段及基座结构的有限元模型	182
6.3 舱段及基座结构的振动模态仿真	185
6.3.1 舱段结构的振动模态仿真结果	185
6.3.2 基座结构的振动模态仿真结果	186
6.4 基座结构至舱段的振动传递特性	191
6.4.1 同类基座结构的振动传递特性	191
6.4.2 不同类基座结构的振动传递特性	193
6.5 基座结构参数对振动传递特性的影响	196
6.5.1 基座面板厚度的影响分析	196
6.5.2 基座整体板厚的影响分析	198
6.5.3 基座结构板厚的灵敏度分析	200
6.5.4 基座结构材料的影响分析	201
6.6 舱段壳体对振动传递特性的影响	202
6.6.1 等厚度的双层壳体结构	202
6.6.2 不等厚度的双层壳体结构	203
6.7 本章小结	205
第7章 舱段内基座结构的振动传递特性实验分析	206
7.1 舱段及基座结构的振动模态实验	206
7.1.1 结构振动模态实验方案	206
7.1.2 基座面板的原点加速度导纳	208
7.1.3 结构振动模态实验结果	210
7.2 基座结构对振动传递特性的影响	212
7.3 基座结构至舱段表面的机械导纳分布	218
7.4 基座结构至舱段表面的等效机械导纳	225

7.5	基座结构至舱段表面的传递率分布	228
7.6	基座结构至舱段表面的等效传递率	234
7.7	本章小结	236
第8章	舱段内基座结构的阻尼—质量复合阻振设计	238
8.1	舱段及基座结构的 FE—SEA 建模	238
8.2	基座结构的质量阻振设计	242
8.3	基座结构的阻尼减振设计	249
8.4	基座结构的阻尼—质量复合阻振设计	253
8.5	平台结构上基座的阻尼—质量复合阻振设计	255
8.5.1	平台支撑结构的质量阻振技术	255
8.5.2	平台支撑结构的阻尼减振技术	257
8.5.3	平台支撑结构的复合阻振技术	258
8.6	本章小结	260
第9章	船舶结构声学预报与声学设计	261
9.1	典型船体结构及构件	261
9.2	船舶舱室振动噪声源	264
9.3	船舶舱室噪声简易估算方法	265
9.4	船体结构声学设计基本准则	266
9.5	船舶舱室整体弹性隔振设计	273
9.6	某舰艇的结构声学设计应用	279
9.6.1	舰艇结构振动模态分析	279
9.6.2	舰艇低频噪声预报模型	281
9.6.3	舰艇低频辐射噪声预报	282
9.6.4	基座结构对振动传递影响分析	285
9.6.5	基座结构阻尼减振效果分析	288
9.6.6	外壳结构对水下声辐射的影响分析	290
9.7	某舰艇中高频水下辐射噪声预报	291
9.7.1	统计能量分析模型的建立	291
9.7.2	舰艇中高频辐射噪声预报	292
9.7.3	某舰艇水下辐射噪声预报的试验验证	293
9.8	船体水下辐射噪声预报程序二次开发	296
9.8.1	开发工具	296
9.8.2	水下噪声预报程序界面开发	297
9.8.3	水下噪声预报程序编译	299

9.8.4 水下噪声预报程序运行	300
9.9 本章小结	301
第 10 章 鱼雷结构与动力系统声学设计	302
10.1 概述	302
10.2 动力系统振动的传递途径分析	305
10.3 基于刚体模型的振动传递分析	306
10.4 基于有限元模型的振动传递分析	313
10.5 动力系统支撑对振动传递的影响分析	319
10.6 壳体结构阻尼对振动传递的影响分析	322
10.7 振动传递的其他影响因素分析	323
10.8 鱼雷动力系统的振动预报	328
10.9 本章小结	332
参考文献	333

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

在军用方面,由舰船机械设备的振动所导致的船体振动及其声辐射一直是振动噪声控制领域关注的重点之一,其研究对海军装备建设具有重要意义。从声学的角度来看,舰船产生噪声的原因是多方面的,其中,机械设备产生的噪声是舰船低速巡航时的主要噪声源。控制和减小舰船机械噪声是实现舰船安静化的首要环节。但是,由于舰船声场形成原因的复杂性和影响因素的多样性,至今还没有系统完善的理论对它进行解析求解。目前对舰船声场的研究和分析,主要从以下两方面开展工作:一方面是根据海上实际测量,并运用信号处理手段研究舰船声场特性。这种方法的缺点是花费很大,环境的影响难以克服,测量不可重复,无法事先进行预报等。另一方面是利用数值计算方法对舰船声场进行建模和计算。这种方法的优点是能较准确地对目标进行数值计算和预报,只要模型选择合理,即可预报声场特性。这种方法能够节省大量的人力物力,只需利用计算机即能完成各种舰船的大量建模和计算。

在民用方面,我国已经成为世界最主要的造船大国。《船舶工业“十二五”发展规划》指出,“十二五”时期,船舶工业将进入由大到强转变的关键阶段。我国经济社会的发展和综合国力的进一步提升,对船舶工业全面做强提出了更紧迫的要求,产业发展既面临重要机遇,也面临严峻挑战。推动技术进步和创新是船舶工业的主要任务:密切跟踪研究国际船舶科技发展趋势和海事规则规范最新要求,以技术先进、成本经济、建造高效为目标,优化主流船型设计,提升船型综合技术经济性能和市场竞争力。

随着舒适性要求的提高,人们对船舶舱室振动噪声的要求也越来越高。随着海洋资源需求的增长,用于海底石油、海洋水质、海洋生物以及海底地貌调查的各种测量船近年来受到关注。由于测量船大多需要借助于水声设备对海洋资源进行探测,其自身的振动噪声需要严格控制,以保证各种精密设备能在安静的环境中正常工作。为了未来的自由航行以及高质量地完成海洋测量的任务,同时保护当地的海洋生物,远洋测量船更需要有安静的水下噪声环境。船舶舱室振动噪声,一方面影响舱室内工作人员的舒适性,容易造成工作人员的

身体疲劳;另一方面影响舱室内精密仪表的可靠性,引起疲劳损坏,同时,容易引起船体结构的疲劳损坏,缩短其使用寿命。因此,在船舶设计阶段对舱室振动噪声进行预报和结构声学设计是必要的。

国际海事组织(IMO)最新通过的《船上噪声等级规则》(自2014年7月1日起生效),依据船舶尺度大小,对1600~10000t和10000t以上的船舶,要求船舶构造应符合如表1.1.1所列的噪声等级规则,以保护人员免受噪声的伤害。

表 1.1.1 《船上噪声等级规则》规定的噪声级限值 (单位:dB(A))

舱室和处所的名称	船舶尺度	
	1600 ~ 10000t	≥10000t
工作处所		
机器处所	110	110
机器控制室	75	75
并非机器处所组成部分的工作间	85	85
非规定的工作处所(其他工作区域)	85	85
驾驶处所		
驾驶室和海图室	65	65
瞭望位置,包括驾驶室两翼和窗口	70	70
无线电室(无线电设备工作,但不产生声响信号)	60	60
雷达室	65	65
居住处所		
居住舱室和医务室(设有床铺的医疗室)	60	55
餐厅	65	60
娱乐室	65	60
露天娱乐区域(外部娱乐区域)	75	75
办公室	65	60
服务处所		
厨房(食物加工设备不工作)	75	75
备膳室和陪膳间	75	75
通常无人处所	90	90

该规范规定,对于暴露时间少于8h且没有采取听力保护措施的船员,不应暴露于超过85dB(A)噪声级的环境中。当船员在高噪声处所停留超过8h时,不应超过80dB(A)的噪声级。因此,在每24h中至少有1/3时间内,每个船员

应处于噪声级不超过 75dB(A) 的环境中。

在船舶设计的早期就应考虑声学方面的要求,这是船舶结构声学设计的基本原则。如果在船舶设计的各个阶段都能将涉及声学的各种要求,体现在具体的设计中,则可用较少的费用获得较好的降低振动和噪声级的效果。船体结构的水下辐射噪声与船体表面振动速度分布密切相关,可以通过对船体结构的振动传递特性分析,实现船体表面振动速度的预报,进而指导结构设计,这是船舶声学设计的主要步骤。

1.2 薄壳结构声振性能数值方法概述

1.2.1 中频组合系统

系统内既有由整体模态控制的强耦合子系统,又有由局部模态控制的弱耦合子系统,这类结构的动态响应问题就成为典型的“中频问题”。近 10 年来,中频振动问题的研究迅速发展,英国、法国、美国等国家的研究取得了大量的理论和应用成果,然而,有关中频振动的理论方法还处于完善之中。学术界将系统振动中局部低频振动与局部高频振动同时存在的复杂振动定义为系统的“中频振动”,并将含有中频振动特征的工程组合结构称为复杂组合系统。

复杂组合系统主要根据耦合子系统间模态特性的差异程度进行判定,一般强调的是复杂结构中各个子系统之间模态特性的差异,而不是指结构的几何外形和连接方式的复杂程度(图 1.2.1)。本书所指的复杂组合系统,既强调复杂结构中各个子系统之间模态特性的差异,又强调结构的几何外形和连接方式的结构复杂程度。车辆、火箭、导弹、船舶等壳体结构,从结构动态特性方面属于复杂组合系统,在几何形状方面也属于复杂薄壳结构。对这些复杂薄壳结构的振动声辐射特性分析与控制技术研究,存在许多共性的理论方法与设计技术。

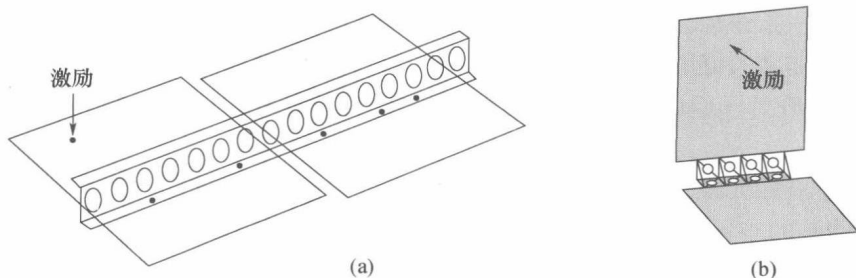


图 1.2.1 板筋结构复杂组合系统

薄壳结构声学设计的主要分析方法有解析法和数值计算法。解析法主要适用于球形、平板、圆柱壳体等简单结构模型,但难以求解复杂的实际工程结构。有限元、边界元法等数值计算方法,比较适用于低频分析,但对于高频分析,由于结构的模态密集,导致计算量大而难以求解。统计能量法是一种适用于高频范围的随机噪声统计方法,在振动噪声分析中得到广泛应用。由于中频段振动组合结构在决定国家竞争力和国家安全的高端技术装备上广泛使用,如何提高系统在中频段的动态设计的准确性和可靠性对于其发射和运行起着至关重要的作用。

1.2.2 低频确定性分析方法

确定性分析方法(Deterministic Methods)以确定性系统为主要研究对象。确定性系统是指系统的结构较为简单、动态分析中仅包含少量的低阶模态,同时系统的物理参数和材料参数易于清晰界定的组合系统。当系统中所有的子系统都能用确定性模型描述时,系统具有典型的“长波”“低模态”的低频振动特征。代表性分析方法有有限元法(FEM)和边界元法(BEM)。低频振动,一般是指系统的各个子系统的外形尺寸短于分析频段相应波长的情况。

有限元法是在20世纪50年代作为解决固体力学问题出现的,传统的有限元分析方法是建立在瑞利-里茨(Rayleigh-Ritz)方法基础上的一种数值计算方法,最初用于航空航天领域的强度、刚度计算。随着计算机水平的提高,有限元法在复杂结构的强度、振动等方面的分析得到了广泛应用,使船舶等复杂工程结构的受力分析成为可能。随着计算机技术、有限元和边界元的发展,数值计算法对水下结构振动噪声的研究越来越重要^[1-4]。对船舶这样的大型复杂结构振动噪声问题,需要求解包含巨大矩阵的结构振动与声场耦合动力方程,计算的工作量相当大。邹春平^[5]利用有限元技术对船舶结构振动进行数值分析,在考虑流固耦合状态下,用有限元法对船舶进行模态分析以及船舶对所有激励力的振动响应数值计算,为船舶设计人员在船舶设计阶段预报船舶结构振动提供了一条途径。船舶动力系统引起的振动通过壳体向水下辐射噪声的预报一直是非常关键的问题。徐张明^[6]建立了带有浮筏结构动力装置的双层壳体船舶的FEM/BEM数学模型,开展了船舶结构的建模及水下振动和辐射噪声计算^[7]。

基于有限元及边界元法,张阿漫^[8]通过对圆柱壳体结构形式(耐压壳板的厚度、肋骨的布置)的改变,分析了结构形式对水下结构辐射噪声的影响,找到了结构形式改变对其结构辐射噪声的影响规律。金广文^[9]用有限元法研究了流固耦合对双层圆柱壳体振动特性的影响。朱锡^[10]采用有限元法研究了基座

结构噪声预报技术。Roger^[11]使用动态缩聚法进行耦合结构系统的中频振动分析。姚熊亮^[12]对加筋圆柱壳由于肋骨数目改变所引起的结构应力参数变化对辐射噪声的影响进行了探索。艾海峰^[13]采用基于模态坐标的有限元/边界元方法,建立水下航行体封闭舱段声学设计模型,利用该耦合分析模型对两端采用刚性圆板封闭的简支舱段结构的振声性能进行分析。姚熊亮^[14]计算了内部含基座的加筋双层壳振动与声辐射,结果表明,基座降低了壳体的振动及声辐射,增加基座面板厚度以及基座长度均能有效降低壳体的辐射噪声。

在包括船舶和海洋工程领域在内的众多领域中,复杂结构的声振问题一直是研究的热点之一。有限元法、边界元法在低频段可以较好地模拟结构的振动和声辐射。但是在中高频段将面临着结构的模态密集与重叠等问题,计算结果对结构的几何尺寸、边界条件和阻尼分布等微小变化非常敏感。此外,结构单元的网格需要更加细化,对计算机性能的要求更高,计算积累误差不断增加。

有限元法结合边界元法的方法可以求解具有任意形状复杂弹性结构外部充满无界流体的水下振动和声辐射问题,但是由于边界元法有网格要求,对于边界元模型,通常假设在最小波长内有6个单元,即最大单元的边长要小于计算频率最短波长的 $1/6$,这使得在做中高频段的舰船声学分析时,计算频率越高,波长越短,单元边长越小,从而造成模型单元数量巨大,使得计算量大大增加,不能达到预期的计算效果。

1.2.3 高频统计性分析方法

统计性分析方法(Statistical Methods)以非确定性系统为主要研究对象。非确定性系统是指系统的结构较为复杂,动态分析中仅包含大量的高阶模态,同时系统的物理参数和材料参数具有相当程度的随机不确定性。当系统中所有的子系统都能用不确定性模型描述时,系统具有典型的“短波”“高模态”的高频振动特征。高频振动一般是指系统的各个子系统的外形尺寸大于分析频段相应波长的情况。代表性分析方法有统计能量法(Statistical Energy Analysis, SEA)。

复杂工程结构随着自由度数目的增加,超过了模态分析法的有效范围,例如某大型船舶300多阶的模态频率也只有8Hz左右^[15],而主要振源中柴油机的频谱为5~1000Hz。船体结构主要由板、杆等结构构成,由于外形尺寸较大,这些构件在较低频时表现为局部波动。统计能量法不关心局部细节问题,模型的局部参数和边界条件对计算结果影响不大,适合于解决这类复杂薄壳结构的声振问题。

统计能量分析的思路来自热辐射交换原理^[16]。采用子系统能量或功率的

某种(频率、空间)平均值作为平衡方程的变量,将经典结构动力学中的稳态响应求解问题转化为类似热力学的能量平衡问题,成为分析复杂结构高频振动和声辐射问题的有效方法。

1962年,R. H. Lyon^[17]提出双线性耦合振子的功率流理论,奠定了经典统计能量法的理论基础^[18]。统计能量法把研究对象从用随机参数描述的总体中抽取出来,不关注被研究对象的具体细节参数,主要关心时域、频域和空间上的统计平均值,采用“能量”观点统一解决振动和声场问题^[19,20]。基于能量的方法由于可以克服传统结构动力学在分析高频问题的某些不足,因而在很多工程领域得到了广泛的应用。

统计能量分析法,目前已成功应用于航空航天、导弹、船舶、汽车和建筑等方面,具有以下优点^[21]:计算方法简单,运用简单的功率流平衡方程,研究结构系统和声学系统等系统之间的相互作用;适用于高频、密集模态的复杂结构;划分子系统并引入损耗因子,在某种程度上掩盖了某些结构及其连接的细节。统计能量分析法能解决以下问题:振源排序,分析得到振源的影响程度;功率流传递路径排序,找出主要的传播途径;灵敏度分析,找到对振动声辐射的敏感参数。统计能量分析法在实际工程中的应用受到限制的主要原因^[21]:复杂结构的参数难以采用理论方法得到;有时难以满足经典统计能量分析的非保守与弱耦合条件;在低频范围不能满足统计假设的要求;不能预测子系统局部位置的精确响应。

统计能量分析法将结构划分成若干子系统,这些子系统以在窄频带内存储的振动能量和模态数的多少为特征。Le bot^[22]用简图的形式提出了统计能量分析有效性的四个检验标准,即模态数和模态振型重叠度要大(≥ 1),单位长度的能量衰减因子和耦合强度要小(≤ 1)。耦合损耗因子和内损耗因子分别用来表示各个子系统之间的耦合程度和能量的损失程度,是统计能量分析法应用中的重要参数。非保守耦合损耗因子是表征耦合系统之间能量传递特征的重要参数。

Mace^[23]研究了统计能量分析中结构损耗因子、耦合损耗因子与结构模态之间的相互关系,并以杆结构为例进行说明。Lin^[24]分析了在点力和力矩激励下L形板的振动响应,指出统计能量法在满足以下条件时能用于预测耦合板结构的平均振动响应:已知子结构系统的耦合损耗因子;激励力离板边沿的位置大于板弯曲波长的 $1/4$,或者板边沿到惯性轴的垂直距离大于板弯曲波长的 $1/4$ 。Svante^[25]通过研究两个弹性耦合系统的振动模态及响应特性,发展了统计能量分析中弱耦合系统功率流的量化检验准则。V. Cotroni^[26]提出使用有限元法、子结构模态综合和周期结构理论的统计能量分析子结构方法,使普通

结构面板的统计能量参数便于计算得到。

统计能量法是分析复杂动态系统结构—声耦合振动响应的有效方法,而结构响应的统计估计是评价 SEA 分析准确性的基本依据,是 SEA 的一个重要组成部分^[27]。盛美萍^[28]提出适合复杂耦合系统的统计能量分析方法,为研究实际机械结构之间的振动传递规律、复杂机械系统的声辐射特性提供理论依据。刘海生^[29]从声振系统激励和响应的频谱特征,预测模型的特点、精度等方面总结了统计能量分析方法在多个领域内的应用成果,得出了含有声子系统的双壳和单壳系统是两种基本的 SEA 声振预测模型的结论。

灵敏度分析是一种评价因设计变量或参数的改变而引起目标函数特性敏感程度的方法,可用于研究系统特性对参数的敏感程度。声学—结构灵敏度^[30]用于预测结构辐射声压随结构参数的变化,这对低噪声结构设计具有重要指导意义。陈萍^[31]在统计能量分析的声学—结构灵敏度分析方法和 AutoSEA2 软件的基础上,利用 C#语言在 .NET 环境中实现了声学结构灵敏度分析软件的设计与开发。殷学文^[32]介绍了舰艇结构振动和声学特性研究进展。

在船舶噪声预测中,统计能量方法与其他方法相比,具有模型简单、计算量小、适应频带宽等优点,且在分析含有高频、高模态密度的复杂系统的耦合动力学问题上有一定的优势。程广利^[21]对经典统计能量法在解决非保守、弱耦合、相关激励等问题的不足和发展等方面进行了讨论,对统计能量法在船舶降噪应用中的问题进行探讨,阐述了统计能量分析法及其在船舶上的应用和局限性。金建海^[33]通过分析中国船舶科学研究中心开发的基于 SEA 的船舶舱室噪声计算方法的建模过程,提出了一种快速建模方法,并重点讨论了其中的舱室自动关联算法,实现了模型的快速消隐显示和云图显示功能,大大提高了建模的效率。吴刚^[34]采用统计能量法对大型集装箱船中高频域振动及舱室噪声数值计算的建模方法进行了研究。张娟^[35]利用统计能量分析软件 AutoSEA2 建立典型动力源激励的某船分段三维模型,分析了动力源激励力的等效计算及此激励产生的辐射噪声。郇茜^[36]对高速船客舱区进行设计初期的噪声预报,并分析噪声传播路径,提出噪声控制的初步方案,模拟计算采取控制措施后的客舱区噪声值。刘凯^[37]建立了鱼雷结构的统计能量分析模型,预报了鱼雷结构的辐射噪声级。缪旭弘^[38]提出用灰色理论预测各子系统模态参数,采用统计能量分析双层圆柱壳体在水下的流固耦合振动和声辐射。李冰茹^[39]对圆柱壳体的高频振动声辐射特性影响因素进行了研究,探讨了壳体本身参数的改变对槽内声腔声压、盖板表面振动以及板外近场流体声场声压的影响。