



声学测量系列

水下黏弹性复合圆柱壳 声振耦合建模与计算

SHUIXIA Niantanxing Fuhé Yuanzhuǒ Shēngzhēn Ōuhé Jiānmó yǔ Jìsuàn

张超 著

HEUP

哈尔滨工程大学出版社

水下黏弹性复合圆柱壳 声振耦合建模与计算

张 超 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书主要以水下结构减振降噪和声辐射预报为背景,系统阐述了水下黏弹性复合圆柱壳的声振耦合建模与计算的解析法理论与声振耦合机理。本书突出了物理模型的数学推导和数值验证,注重理论推导与工程实践应用相结合,可作为水声科研人员的参考书和研究生教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

水下黏弹性复合圆柱壳声振耦合建模与计算/张超
著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017. 6
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1550 - 8

I. ①水… II. ①张… III. ①水下声源—减振降噪—
物理模型 ②水下声源—减振降噪—计算方法 IV. ①TB561
②TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 151916 号

选题策划 付梦婷
责任编辑 张忠远 付梦婷
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京中石油印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 12.25
字 数 264 千字
版 次 2017 年 6 月第 1 版
印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷
定 价 35.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

序 言

随着科学技术的突飞猛进,以及人口膨胀、资源短缺、环境恶化等世界性问题的凸显,海洋越来越明显地显示出其在资源、环境、空间和战略等方面得天独厚的优势,世界各国普遍认识到,海洋将成为人类生存与发展的新空间,成为沿海各国经济和社会可持续发展的重要保障,成为影响国家战略安全的重要因素。进入21世纪后,我国提出了“逐步把我国建设成海洋经济强国”的宏伟目标,目前正阔步向海洋强国迈进。近年来,我国周边海洋局势比较紧张,各种海洋争端不断出现,已经严重威胁到了我国海洋权益和国土安全,所以我国迫切需要建设一支强大的海洋国防力量,筑起一道保卫海洋的钢铁长城。

潜艇已经成为世界沿海各国重要的水下战略武器,其优势就在于隐蔽性和机动性,但是辐射噪声过高将严重影响到潜艇的隐蔽性,从而威胁到潜艇的水下安全。为此,世界各国都十分重视潜艇水下结构声学特性的研究。其中,辐射噪声预报和减振降噪是两个重要的研究方向:即一方面根据艇体结构和设备激励事先预报其辐射噪声水平,从而确定自身的安全活动半径,亦可对自身的声防护措施进行评估;另一方面则采取各种吸隔声技术、敷设阻尼材料和开展结构声学设计等措施降低艇体的振动声辐射水平,达到减振降噪的目的。

圆柱壳是水下航行体的典型结构,所以对圆柱壳这种相对简单规范的结构进行理论和试验研究,有助于揭示圆柱壳水下的振动声辐射机理,有利于对提出的理论和试验方法进行检验和评估,因此受到国内外学者的广泛关注。要开展水下圆柱壳振动声辐射研究,首先要解决如何建模的问题,目前对此已经形成了多种方法。随着计算机水平的发展,以有限元为代表的数值计算方法发展比较迅速,可以解决各种形状结构的水下振动声辐射计算问题,但是数值计算方法过分追求网格精确划分,已使研究问题严重受限于计算机计算能力,同时数值计算也不利于揭示物理本质;解析法是理论分析物理问题的传统方法,有助于揭示问题的物理本质,但是对于水下圆柱壳振动声辐射问题,还须考虑到模型的有限长尺寸、声学覆盖

层、复杂加强结构等新问题,目前相关研究虽然较多,但是还不够系统完善,有些新问题还未涉及,部分理论方法也缺乏有效的验证。

本书旨在详细阐述水下黏弹性复合圆柱壳振动声辐射解析建模方法,对建模方法进行验证,探求问题的物理机理,为水下结构声辐射预报和减振降噪工作提供一些帮助。

全书共分为6章。第1章介绍了本书研究背景,综述了水下黏弹性复合圆柱壳振动声辐射问题的建模方法、研究方向、存在问题等国内外研究现状;第2章建立了相对严格的敷设均匀黏弹性声学覆盖层的圆柱壳振动声辐射模型,研究了覆盖层建模过程中的矩阵病态性问题以及均匀黏弹性层的抑振去耦特性;第3章介绍了复杂声学覆盖层的等效参数建模方法,并以多层复合覆盖层和含空腔覆盖层为例,进行了等效参数反演的仿真计算和验证;第4章采用模态叠加法,系统建立了含环肋、实肋板、内外壳覆盖层的环向加强复杂圆柱壳的振动声辐射建模方法,并分析了双层圆柱壳的振动声辐射机理;第5章对传统纵肋建模方法进行改进,介绍了水下纵肋加强圆柱壳的振动声辐射模型;第6章分别介绍了单、双层复合圆柱壳振动声辐射湖上试验,提出了基于声辐射效率计算预报模型辐射声功率的方法,验证了复合圆柱壳振动声辐射建模理论,研究了声学覆盖层的声振去耦特性。

本书突出了物理模型的数学推导和数值验证,注重理论推导与工程实践应用相结合,可供从事水下目标声学特性建模、预报及减振降噪等相关的水声工程专业技术人员参考,也可作为研究生的专业课教材及参考用书。

本书是著者在商德江教授的悉心指导,无私帮助和诚挚关怀下完成的,在此向商德江教授致以最崇高的敬意。

本书得到国家自然科学基金项目“水下离散空腔粒子隔声层低频隔声机理研究”(编号11404078)和国家自然科学基金项目“水下复杂声学覆盖层声学和材料参数反演方法研究”(编号11404079)的资助。

限于著者水平,书中难免有不妥之处,还望读者不吝指正。

著者

2017年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
第 2 章 均匀声学覆盖层建模及声振特性	9
2.1 近似建模	9
2.2 严格建模	16
2.3 直角坐标变换的覆盖层建模	37
2.4 声振特性分析	44
2.5 本章小结	49
第 3 章 复杂声学覆盖层振动声辐射建模	51
3.1 建模理论	51
3.2 等效参数搜索方案	54
3.3 多层复合覆盖层等效参数反演建模	56
3.4 含空腔覆盖层等效参数反演建模	75
3.5 本章小结	85
第 4 章 环向加强复杂圆柱壳振动及声辐射	87
4.1 建模理论	87
4.2 声学覆盖层隔声去耦作用	105
4.3 外壳对双壳声辐射的贡献和作用	109
4.4 内外壳间振动声辐射耦合特性	120
4.5 本章小结	131
第 5 章 纵向加强复杂圆柱壳振动及声辐射	132
5.1 建模理论	132
5.2 建模方法比较	137
5.3 纵肋对圆柱壳的振动及声辐射作用	140

5.4 纵肋加强与环肋加强的比较	151
5.5 本章小结	155
第6章 水下复合圆柱壳振动声辐射试验	156
6.1 单层复合圆柱壳振动声辐射试验	156
6.2 双层复合圆柱壳振动声辐射试验	168
6.3 本章小结	176
参考文献	178

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

我国拥有约 470 万平方公里的蓝色海洋国土,这片海域的海底蕴藏着大量的油气和其他矿产资源,海洋中蕴含着丰富的海洋生物和其他渔业资源,海面连通太平洋和印度洋,拥有繁忙而极具战略重要性的海洋航道。随着海洋意识的增强,近年来,我国加强了对海洋资源的开发、利用和保护;但同时,受各种利益和政治因素的驱使,我国海洋国土受到周边国家的蚕食,海洋领土安全受到严峻挑战,尤其因近年来钓鱼岛问题、南海问题的热度升级,我国迫切需要进一步提升海洋国防力量,加快海洋武器装备建设和升级,震慑敌对势力,捍卫海洋权益,维护地区安全与稳定。

潜艇是海洋武器装备的重要力量,其隐蔽性好,机动灵活,对维护我国海洋领土安全具有重要的战略意义。从水声学的角度,潜艇要想发挥好其安全隐蔽、机动灵活的巨大优势,前提条件是要保证水下足够的安静性。因此,潜艇的水下声隐蔽性问题受到了国内外的广泛关注。该问题分为两个方面。一方面要对潜艇自身的振动声辐射水平进行有效控制。机械设备振动激励引起艇体振动形成声辐射,是潜艇辐射噪声的重要组成部分,降低机械设备的振动,抑制艇体的振动,都可以实现对艇体的辐射噪声控制,在潜艇辐射噪声控制方面各国都投入了大量的人力物力,采取了各种措施进行控制^[1~2]。另一方面,也需要对自身的振动声辐射水平进行实时监测和预报,以帮助确定艇体的安全活动半径。目前国外已经将声学预测系统应用于潜艇的噪声预报。据第六届国际潜艇会议论文介绍,法国造船管理局为新一代潜艇设计研究了 ASS 声学状态监控系统,并安装了大量的振动传感器和水听器^[3]。

为实现潜艇振动辐射噪声的有效控制和实时预报,需要对潜艇的振动声辐射机理进行深入研究。敷设声学覆盖层是降低潜艇振动声辐射的重要措施,目前已经有了多种结构和功能的声学覆盖层,衍生出阻抗渐变吸声结构、微粒复合吸声结构、声学晶体、压电复合吸声结构等多种结构的覆盖层^[4],作为一种普遍应用的减振降噪措施,如何优化设计并开发减振降噪效果更好的声学覆盖层,则需要对覆盖层的隔声去耦机理进行深入的研究。此外,潜艇是一个复杂的耦合整体,从振动激励源到艇体振动,到与覆盖层的耦合作用,到声辐射,都是彼此耦合不可分割的。

因此,潜艇的顶层声学设计、减振降噪措施的制定等改进,都必须建立在对潜艇复杂振动声辐射耦合机理的深入认识的基础之上。

潜艇是一个十分复杂的结构系统,它包括各种设备、管路、加强结构、动力和武器设施、覆盖层等结构。对潜艇直接的建模及分析是很困难的,将其简化为单层或双层加强圆柱壳结构,进行振动声辐射基本规律和机理方面的理论分析和研究则是现实可行的。本书以敷设声学覆盖层的单层和双层复合加强圆柱壳为研究对象,开展水下振动声辐射理论建模及相关的振动声辐射耦合机理研究,以期丰富和深化对水下圆柱壳结构振动声辐射耦合作用机理的认识。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 声学覆盖层建模及声振特性

1. 均匀声学覆盖层

均匀声学覆盖层是最简单的声学覆盖层,其建模方法和声振特性的研究是声学覆盖层研究的基础性问题,具有重要意义。

均匀声学覆盖层的建模方法经历了从简单到复杂的一个逐步完善的过程。在早期,B. Laulagnet^[5~6]将均匀声学覆盖层处理为一种局部反作用材料,不考虑质量,仅用一个复刚度描述覆盖层,即把覆盖层处理为一个无质量的弹簧,王祖华^[7]也用同样的方法对覆盖层建模。作为改进,后来的学者将其视作流体^[8~9],用特性阻抗来描述覆盖层的声学特性,这种处理简单易行,物理意义明确,但是忽略了覆盖层的剪切变形。目前,均匀声学覆盖层一般被视作黏弹性层,同时考虑了覆盖层的压缩变形和剪切变形。邹元杰^[10]采用有限元与边界元结合的方法对覆盖层建模。关于解析法,由于黏弹性方程 Navier 方程求解比较困难,基于覆盖层厚度远小于压缩波波长的考虑,最初采用覆盖层厚度方向位移用泰勒级数展开的方式求解 Navier 方程,相关文献参见陈美霞^[11]、田宝晶^[12]、严谨^[13~14]、B. Laulagnet^[15]的研究。这种级数展开的方法依然存在一定程度的近似,更理想的方式是对 Navier 方程直接进行求解。1959 年,Denos C. Gazis^[16]在研究中空弹性圆柱中三维波传播问题时给出了柱坐标下三维 Navier 方程的求解方法,在此基础上,后来张俊杰^[17]、Sung-Hwan Ko^[18]等人分别采用直接求解三维 Navier 方程的方式对覆盖层建模,使得均匀黏弹性声学覆盖层的建模问题更加完善。

在均匀覆盖层声振特性研究方面,B. Laulagnet^[15]指出覆盖层能在一个较大频率范围内降低圆柱壳的辐射声功率,并研究了覆盖层的反共振现象;B. Laulagnet^[6]



和王祖华^[7]分别研究了部分敷设阻尼层对圆柱壳声辐射的影响,指出部分敷设阻尼层存在声泄露效应;陶猛^[9]、张俊杰^[17]和陈美霞^[11]分别基于无限大平板、单层圆柱壳和双层圆柱壳研究了阻尼层不同参数对圆柱壳振动声辐射的影响,指出降低阻尼层材料的杨氏模量、减小厚度和增大损耗因子,都有利于降低结构的辐射声功率。

均匀黏弹性层虽然结构简单,但是在进行柱坐标系下三维黏弹性方程的建模求解时,存在矩阵病态性问题^[17]。这会导致计算结果严重奇异,除进行高精度计算外,目前还没有很好的解决办法,因此,均匀覆盖层的三维黏弹性建模问题还需要进一步完善。

2. 复杂声学覆盖层

随着工程需要的提高,仅靠均匀覆盖层已经无法满足水下结构减振降噪的要求,声学覆盖层已经逐步发展出多种复杂结构形式,功能也更加先进^[4,19~20]。

多层复合覆盖层是相对简单的一种复杂声学覆盖层,它由多层不同材料参数的均匀层复合而成,具有阻抗渐变的特点,从而具有新的声振特性。N. Alam^[21]研究了圆柱壳上由任意层各向同性黏弹性复合层的振动和阻尼特性。陶猛^[22]和白振国^[8]分别用解析法研究了复合多层覆盖层对单层和双层圆柱壳声辐射的影响。

复合夹层覆盖层是由两层弹性约束层和一层芯层构成,易于产生剪切形变,从而达到消耗振动和声能的目的。K. Daneshjou^[23]研究了内填多孔材料的复合双壁圆柱壳的波传播。王盛春^[24]考虑到芯层横向剪切变形和正交各向异性影响,研究总结出了蜂窝夹层板的声振特性。

更为复杂的声学覆盖层是内部含有结构的声学覆盖层,它在黏弹性基底中,开挖各种形状的空腔,填充各种添加物,如在基地橡胶材料中掺入金属颗粒等,以此来改善声学覆盖层的隔振和吸声性能^[4]。

由于复杂结构声学覆盖层结构非常复杂,目前已经报道的研究方法包括有限元法、声阻抗法和近似解析法三种。关于有限元法,王曼^[25]建立了含空腔结构声学覆盖层的有限元模型;陶猛^[26]采用 ANSYS 软件计算了含圆柱空腔的吸声覆盖层的声学特性。关于声阻抗法,余晓丽^[27]在声管中测量了覆盖层样品的声阻抗;白振国^[8]利用声阻抗矩阵对消声覆盖层的声学特性进行了建模。关于近似解析法,白国锋^[28]从理论上研究了变截面波导声传播理论模型等多个复杂覆盖层理论计算模型;G. Gaunard^[29]和陶猛^[30]都采用黏弹性理论计算了共振腔型覆盖层的低频吸声机理,指出吸声覆盖层的共振不是指空腔的共振而是黏弹性圆柱腔体的共振;赵宏刚^[31]采用多重散射理论研究了含有周期球腔的黏弹性覆盖层的消声性能;朱蓓丽^[32]给出了带圆柱通道橡胶体的等效参数,用等效参数法研究了该声学覆盖层的声学性能。

当覆盖层敷设在壳体上后,结构和流体耦合状态下的声学特性可能与覆盖层本身自然状态下的声学特性不同,其参数往往事先难以获取,这给声学覆盖层声学性能的评价和耦合状态下的噪声预报带来了困难。声管中测量覆盖层声阻抗的方法受限于小样品测试,声全息法可实现大样测试,但测量精度要求较高,工程实施困难。因此,壳体结构耦合状态下的覆盖层建模及预报问题还需要进一步研究。

1.2.2 复杂圆柱壳振动声辐射建模及机理研究

1. 环向加强圆柱壳

圆柱壳是水下航行体的典型结构,对圆柱壳振动声辐射的研究一直是国内外研究的热点。通过环肋、实肋板对圆柱壳进行环向加强的同时,也在一定程度上影响了圆柱壳的振动声辐射特性。

在环向加强圆柱壳的建模方面,已经形了解析法、数值法等多种建模方法。P. R. Paslay^[33]早在 20 世纪 60 年代就建立了水下有限长环肋加强圆柱壳计算模型,研究了其振动特性之后 P. R. Stepanishen^[34]基于薄壳理论建立了经典的水下圆柱壳振动声辐射模型。接着, B. Laulagnet^[35]基于 Hamilton 原理建立了有限长环肋加强圆柱壳的声辐射模型,谢官模^[36]也做了类似的工作,这些方法成为圆柱壳建模的经典方法,在此基础上逐渐形成了数值、半数值半解析、解析等多种方法。商德江^[37]和陈美霞^[38]先后采用“有限元 + 边界元”法计算了圆柱壳的声辐射问题,又和卫平^[39]、刘涛^[40]分别采用统计能量法和数值解析混合方法研究了复杂圆柱壳的声辐射; C. J. Wu^[41]采用波数域方法(WDA)和边界积分方程(BIE)相结合的方法研究了双层圆柱壳的结构声耦合;刘涛^[42]和严谨^[43]分别采用共振理论和波传播方法研究了圆柱壳的声辐射。更多的文献是基于模态叠加的解析计算方法进行的,陈美霞^[44]研究了有限长加筋双层圆柱壳的低阶模态的声辐射问题;殷学文^[45]对无限长多层复合圆柱壳体的振动和声辐射进行了综述性和系统性的研究,为后来者提供了较多参考。

以上的经典方法都是基于薄壳理论,对于厚圆柱壳的研究相对较少。此外, A. G. Pathak^[46]基于弹性理论用 Navier 方程建立了水下无限长弹性圆柱壳的谐和声辐射模型,也为圆柱形黏弹性覆盖层的建模提供了参考; Jun - jie Zhang^[47]采用该方法研究了水下任意厚阻尼壳的声辐射。除此之外,国内外学者还采用多种分析方法对水下圆柱壳的振动声辐射问题进行了研究; Lecable^[48]采用 FFT 法计算了圆柱壳的辐射声场; 钱斌^[49]基于有效线导纳理论分析了单筋圆柱壳的振动与声辐射; 曹雷^[50]采用 Riccati 传递矩阵法分析了有限长环肋圆柱壳的声辐射性能; M. V. Kunte^[51]分析了无限长圆柱壳的耦合波数。这些研究加深了人们对圆柱壳水下振动声辐射的认识。

在工程上,实际圆柱壳模型具有复杂的壳壁结构和内部子结构,所以简单的圆柱壳建模分析还不能满足实际需要。国内外学者在复杂圆柱壳研究方面也做了较多工作。

关于复杂壳壁的研究,梁斌^[52]基于 Love 薄壳理论和 Rayleigh-Ritz 方法研究了功能梯度材料圆柱壳的振动特性,X. Cao^[53]建立了双周期环肋加强可剪切形变的层合圆柱壳声振模型,对其螺旋波谱进行了研究,A. Harari^[54]建立了水下三层复合圆柱壳振动模型。关于含有内部子结构的圆柱壳振动及声辐射研究,A. Harari^[55]和 J. H. Wu^[56]各自对带平板封头的圆柱壳的水下振动及声辐射问题进行了理论建模和试验研究;Choi^[57]建立了内部带有环板结构的水下轴对称圆柱壳的非轴对称振动和声辐射;殷学文^[58]则采用有限元法研究了具有浮筏的有限长圆柱壳的振动和声辐射。对于更加普遍的具有环肋、实肋板、舱壁板的双层圆柱壳的水下振动声辐射建模,吴文伟^[59]和曾革委^[60~61]给出了一般通行的建模方法,并进行了相应的分析。

关于不同激励源作用下圆柱壳的声辐射问题,国内外许多学者也进行了大量的研究。激励力一般采用径向集中点力,而 Y. P. Guo^[62]研究了切向力和径向力作用下圆柱壳的声辐射;Burroughs^[63]更加全面地研究了七种不同类型的集中激励力对加肋圆柱壳声辐射的影响,陈美霞^[64]则进一步研究了六种不同激励力对双层圆柱壳声辐射的影响;陈明^[65]采用解析法研究了内部声源激励下双层圆柱壳对振动和声辐射的屏蔽作用;Hu^[66]研究了多源随机激励下水下多舱段圆柱壳辐射声功率在不同频段上的合成规律。

在圆柱壳声辐射特性的研究方面,学者们研究了圆柱壳的声辐射效率以及声辐射影响因素,并提出了相应的降低声辐射的优化措施。在声辐射效率研究方面,C. Wang^[67]采用解析法研究了机械激励下有限长环肋圆柱壳的声辐射效率问题;而程钊^[68]则采用模态叠加法,推导并提出了水中有限长无肋圆柱壳平均声辐射效率的半经验公式,并通过引入修正因子推广到了加肋圆柱壳的情况。在圆柱壳声辐射影响因素方面,李冰茹^[69]、吴培荣^[70]、陈美霞^[71~72]、马旭^[73]和张聪^[74]等人分别研究了互辐射阻抗、壳厚度、实肋板、内外壳和边界条件等因素对圆柱壳水下声辐射的影响规律。在结构优化方面,通过分析圆柱壳刚度,艾海峰^[75]提出了增大局部结构刚度降低水下结构低频声辐射的方法,夏齐强^[76]提出了在靠近激励源的环肋上附加合适的质量块降低圆柱壳声辐射的方法,而 Cao^[77]则提出了用压电堆力作动器实现圆柱壳低频声辐射主动控制的方法。

综上所述,虽然水下复杂圆柱壳的解析建模研究已经很多,但是,对理论模型的验证工作少有报道,对环肋、实肋板等子结构的建模方法及简化程度各异,还有待验证和提高,覆盖层的去耦作用、外壳对双壳声辐射的贡献和作用、内外壳间振

动声辐射耦合等机理问题的研究也有待进一步深入。

2. 纵向加强圆柱壳

在工程上,圆柱壳体结构通常采用环向加强的方式,纵向加强通常以龙骨和纵向铺板的形式存在。目前,环肋对圆柱壳振动声辐射作用的研究较多,而有关纵肋的研究文献则相对较少。

国外早期以研究纵肋加强圆柱壳空气中的振动为主。20世纪70年代,Rinehart^[78]采用能量方法研究了纵肋圆柱壳的自由振动,其中纵肋采用Vlasov薄壁梁理论;Wang^[79]研究了任意边界条件下纵肋圆柱壳的自由振动;Mead^[80]也研究了该问题。在空气声学方面,Koval^[81]以纵肋加强圆柱壳为模型研究了飞机舱的声透射问题。在水下声振研究方面,Guo^[82-83]研究了带内部纵向平板的圆柱壳的声散射问题,对纵肋的研究有一定的借鉴意义;Choi^[84]采用变分原理研究了带内部非轴对称子结构的有限长圆柱壳的声辐射,该子结构为两条纵肋;Ding^[85]用Adjacent Equilibrium方法研究了纵向和环向加强的双层圆柱壳的强度和稳定性,即纵横加肋问题;Ramachandran^[86]采用统计能量法预测了纵向加强圆柱壳的模式密度、声辐射效率和声响应,并进行了试验验证;Hull^[87]采用严格的三维弹性理论,建立了纵肋加强圆柱壳计算模型,并与有限元法进行了比较验证。

国内,廖长江^[88]采用附加阻抗的方式处理纵骨,建立了有限长纵向加肋圆柱壳的振动声辐射模型,并分析了肋骨数目对圆柱壳振动声辐射的影响;而石焕文^[89]则采用FEM/BEM方法建立了加肋平底圆柱壳模型,并分析了肋高、肋宽等对声辐射的影响;在解析法方面,曾革委^[90]采用直梁理论描述纵骨运动,采用模态叠加法建立了外壳板采用纵骨加强的双层圆柱壳的声辐射模型,指出在较低频段纵骨加强使得辐射声压增大;在纵横加肋圆柱壳方面,文丽^[91]以反力描述肋骨作用采用模态叠加法建立了水下有限长纵横加肋圆柱壳模型。但是,由于纵横加肋问题采用解析法很难描述清楚,忽略因素较多,因此,现在多采用数值方法,陈明军^[92]和王路才^[93]分别采用“有限元+边界元”法建立了纵横加肋圆柱壳模型,并且指出纵骨能有效降低圆柱壳水下辐射噪声。

综上所述,纵肋的解析建模研究仍然相对较少,且仅考虑了纵肋的径向弯曲运动,简化程度较大,因此,纵肋的解析法建模还需要进一步改进,其对圆柱壳振动声辐射特性的影响也需要进一步研究。



1.2.3 水下复合圆柱壳振动声辐射试验研究

1. 声辐射预报方法

在工程上,经常需要对结构的辐射噪声进行预估,因此,水下结构声辐射预报问题一直是国内外研究的热点。水下结构往往比较复杂,有限元和边界元法对结构适应能力强。为此,Everstine^[94~95]采用有限元和边界元耦合的方法计算了水下三维弹性结构的声辐射和声散射,Zhou^[96]也进行了类似的研究;贺晨^[97]则综合有限元边界元耦合法、统计能量法建立了圆柱壳全频段声辐射预报方法。作为对有限元法的改进,缪旭弘^[98]将完美匹配层方法引入水下结构的有限元建模,建立了水下大型复杂圆柱壳中高频振动噪声预报方法。在理论计算方面,Koopmann^[99]采用波叠加法计算辐射噪声;时胜国^[100]基于声辐射效率和结构表面振速提出了辐射噪声的工程估算方法;和卫平^[101]从有限个结构测点数据获取结构声辐射模态参与系数进行辐射声功率预报,Tao^[102]和 Wang^[103]基于声辐射预报的测点布置原则进行了研究。在工程应用方面,金广文^[104]定义了参数声辐射因子,基于外壳表面振速重构理论提出了辐射噪声实时预报方法。

要基于振动监测实现辐射噪声的实时预报,振动传递的方法是一种简单易行的方法。在水下圆柱壳振动传递特性研究方面,姚熊亮^[105~106]、金广文^[107]和张磊^[108]都进行了理论分析和试验研究。在传递法的声辐射预报应用方面,赵智伟^[109]利用传递矩阵法,由耐压壳振动预报轻外壳振速,再利用边界元技术预报辐射声场;金广文^[110]先测得内外壳体响应的振动传递率矩阵,再利用实测内壳振动实现外壳振动的预报;陈美霞^[111]推导了圆柱壳测点子系统振动能量到壳体表面所有子系统振动能量的传递函数,以此来预报壳体表面均方振动速度级。

2. 振动声辐射试验研究

圆柱壳水下声学试验研究,一方面是验证理论方法有效性的重要手段,另一方面也是理论研究的重要补充。在有些理论方法还未形成的情况下,试验研究更显得重要。因此,试验研究作为探究圆柱壳声振特性不可或缺的重要方法,一直备受学者关注。T. Musha^[112]基于近场声压测量采用 Helmholtz 积分方程预报了船体的辐射声场并与试验结果有较好的一致性;何元安^[113]提出了一种基于传递函数不变意义下的均方加速度法来估算水下结构辐射噪声,并分别对两个类柱形结构模型进行了试验研究;JI Gang^[114]针对一个 1.8 m 长的双层圆柱壳模型开展了机械激励振动声辐射试验,FEM/BEM 计算结果与试验结果吻合较好;Loock^[115]分别在空气中和水下进行了长圆柱壳振动声辐射试验,并与数值计算结果进行了比对;曾革委^[116]根据力和加速度到声辐射的传递关系预报了实艇的辐射噪声,与测量结果在

1/3 的 Oct 频带内能够符合;刘向东^[117]基于双层圆柱壳开展了阻尼材料不同敷设情况的声辐射试验研究;陈美霞^[118]以单、双层环肋圆柱壳为对象,进行了力激励与声激励对比试验研究。在试验测量技术方面,高岩^[119]利用柱形封闭包络面法测量圆柱壳的辐射声功率;孙贵青^[120]给出了利用矢量水听器测量水下目标低频辐射噪声的基本原理;俞孟萨^[121]在水池半混响条件下,测量了圆柱壳的辐射声功率,高频偏差 1~2 dB;尚大晶^[122]通过测量声源的空间平均声压功率谱,提出了辐射声功率混响水池测量方法,后来又用该方法测量了水下翼形结构的流噪声^[123]。

第2章 均匀声学覆盖层 建模及声振特性

均匀声学覆盖层通常为层各向同性的均匀橡胶层。它利用自身的阻尼特性,起到降低结构振动、减小声辐射的作用。对于均匀声学覆盖层的研究,有助于深入认识声学覆盖层的作用机理,是研究复杂声学覆盖层的基础。本章以圆柱壳为敷设载体,首先给出覆盖层的近似建模方法;然后基于黏弹性理论推导出覆盖层的严格建模方法,在对该方法中覆盖层势函数系数矩阵病态性分析的基础上,提出了基于直角坐标变换的覆盖层建模方法;最后对均匀声学覆盖层的去耦特性和隔振特性进行了分析。

2.1 近似建模

虽然均匀黏弹性层是最简单的声学覆盖层形式,但是在柱坐标下严格求解敷设均匀声学覆盖层的圆柱壳的振动声辐射问题依然具有相当的复杂性。目前为简化计算,已经发展出了几种近似建模方法,这里仅就视作流体的建模方法和声阻抗法建模进行介绍。

2.1.1 复合圆柱壳模型

声学覆盖层的建模离不开其敷设载体。这里首先给出整个复合圆柱壳的振动声辐射解析计算模型。设圆柱壳长为 L ,截面半径为 a ,壳厚为 h ,外面敷设一层均匀声学覆盖层,两端简支在半无限长刚硬圆柱障板上,置于无限大水域中,模型如图2.1所示。

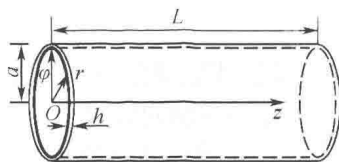


图 2.1 复合圆柱壳模型

对圆柱壳运动的描述一般采用 Donnell 方程^[124],但由于该理论简化程度较大^[125],这里采用相对精确的 Flügge 薄壳理论描述圆柱壳运动,如下式^[126]

$$\begin{cases} L_{11}u + L_{12}v + L_{13}w = 0 \\ L_{21}u + L_{22}v + L_{23}w = 0 \\ L_{31}u + L_{32}v + L_{33}w = (1/\rho_p c_p^2 h)(f - p_c) \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 u, v, w ——壳体轴向、周向和径向位移;

c_p ——平板中平面波相速度, $c_p = \sqrt{E/[(1-\gamma^2)\rho_p]}$;

E, γ, ρ_p ——壳体材料杨氏模量、泊松比和密度;

$\beta^2 = h^2/(12a^2)$ 。

另外, f 为外激励力, p_c 为覆盖层对壳体的径向作用力, L_{ij} 为圆柱壳微分算符, 计算方式如下:

$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1-\gamma}{2a^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \beta^2 \frac{1-\gamma}{2a^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, L_{12} = \frac{1+\gamma}{2a} \frac{\partial^2}{\partial \varphi \partial z} \\ L_{13} &= \frac{\gamma}{a} \frac{\partial}{\partial z} - \beta^2 a \frac{\partial^3}{\partial z^3} + \beta^2 \frac{1-\gamma}{2a} \frac{\partial^3}{\partial \varphi^2 \partial z}, L_{21} = L_{12} \\ L_{22} &= \frac{1-\gamma}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \beta^2 \frac{3(1-\gamma)}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}, L_{23} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \beta^2 \frac{3-\gamma}{2} \frac{\partial^3}{\partial \varphi \partial z^2} \\ L_{31} &= L_{13}, L_{32} = L_{23}, L_{33} = \frac{1}{a^2} + \beta^2 \left(a^2 \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial z^2 \partial \varphi^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) + \beta^2 \left(1 + 2 \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \end{aligned}$$

由简支边界条件, 壳体位移可以写成如下模态叠加的形式^[12] (省略 $\exp(j\omega t)$)

$$\begin{pmatrix} u(\varphi, z) \\ v(\varphi, z) \\ w(\varphi, z) \end{pmatrix} = \sum_{\alpha=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \begin{pmatrix} U_{nm}^{\alpha} \sin\left(n\varphi + \frac{\alpha\pi}{2}\right) \cos(k_m z) \\ V_{nm}^{\alpha} \cos\left(n\varphi + \frac{\alpha\pi}{2}\right) \sin(k_m z) \\ W_{nm}^{\alpha} \sin\left(n\varphi + \frac{\alpha\pi}{2}\right) \sin(k_m z) \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

式中 $U_{nm}^{\alpha}, V_{nm}^{\alpha}, W_{nm}^{\alpha}$ ——三个方向的模态展开系数;

k_m ——轴向波数, $k_m = m\pi/L$;

α ——0 或 1 分别代表周向反对称或对称模态;

$0 \leq z \leq L$ 。

将外激励力和覆盖层对壳体的作用力 f 和 p_c 都进行式(2-2)同样的模态分解, 可得

$$f = \sum_{\alpha=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} F_{nm}^{\alpha} \sin\left(n\varphi + \frac{\alpha\pi}{2}\right) \sin(k_m z) \quad (2-3)$$

$$p_c = \sum_{\alpha=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} P_{nm}^{\alpha} \sin\left(n\varphi + \frac{\alpha\pi}{2}\right) \sin(k_m z) \quad (2-4)$$