


学术专著

水下大型结构 振动声辐射 预报技术引论

Introduction to Noise and Vibration
Prediction Techniques for Large
Scale Underwater Structures

刘金实 | 著

 江西科学技术出版社

刘金实

毕业于哈尔滨工程大学水声工程专业，2015年获工学博士学位，现任教于江苏科技大学。主要研究方向为水下结构的减振降噪、低噪声设计等。近年在国内外期刊及会议发表学术论文多篇。

学术专著

水下大型结构 振动声辐射 预报技术引论

Introduction to Noise and Vibration
Prediction Techniques for Large
Scale Underwater Structures

刘金实 | 著

江西科学技术出版社

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

图书在版编目 (C I P) 数据

水下大型结构振动声辐射预报技术引论 / 刘金实著
· 一 南昌 : 江西科学技术出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5390-6366-9

①水… II. ①刘… III. ①水下一结构振动—声辐射—预报 IV. ①O327

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第099181号

国际互联网(Internet)地址: <http://www.jxkjcs.com>

选题序号: ZK2017303

图书代码: B17121-101

水下大型结构振动声辐射预报技术引论

刘金实 著

出版 江西科学技术出版社
发行
社址 南昌市蓼洲街2号附1号
邮编: 330009 电话: (0791)86623491 86639342(传真)
印刷 虎彩印艺股份有限公司
经销 各地新华书店
开本 787mm × 1092mm 1/16
字数 85千字
印张 8.75
版次 2018年6月第1版 2018年7月第1次印刷
书号 ISBN 978-7-5390-6366-9
定价 21.00元

赣版权登字-03-2018-126

版权所有, 侵权必究

(赣科版图书凡属印装错误, 可向承印厂调换)

摘要

潜艇辐射噪声是衡量其作战性能及生存能力的重要指标，是破坏其声隐身性能的主要因素。对水下结构的振动与声辐射进行预报，是减振降噪、声学优化设计的重要依据。因此，在保证预报准确性的同时，提高水下大型结构的预报计算效率，对潜艇声隐身技术的发展具有重要意义。

本文以实现水下结构声辐射的快速预报为主要研究内容，针对经典声学边界元法在存在的特征频率处矩阵奇异的问题，提出了相应的改进方法；针对边界元法计算量和内存占用量大的问题，从近似的角度出发，提出了压缩边界元矩阵、提高求解速度的方法；针对有限元-边界元耦合矩阵数值特性复杂、求解困难的问题，提出了基于区域分解思想的快速求解方法。

首先根据结构振动的频域方程与声辐射预报的边界元法，推导了自由场中结构振动声辐射的有限元-边界元方程。针对边界元法在特定频率下出现矩阵奇异的问题，提出了改进的CHIEF方法。该方法不仅解决了矩阵奇异问题，还克服了CHIEF方法形成超定方程的缺点，使求解效率得到提高。将有限元-边界元法应用于水下典型球壳与圆柱壳的声辐射预报中，通过将计算结果与理论解、SYSNOISE软件计算结果对比，验证了方法的有效性，详细分析了改进CHIEF方法对计算效率的影响。

针对自由场中的声辐射预报问题，研究了一种基于自适应交叉近似（ACA）技术的快速边界元方法，结合SVD重压缩技术，在降低边界元矩阵内存占用量的同时提高了边界元矩阵与向量相乘的速度，实现了相应的迭代求解器，解决了传统边界元法计算量、内存占用量巨大的问题。针对实际应用中可能存在的任意长宽比模型，采用基于主成分分析（PCA）的求解域分割方法。

通过数值仿真对可能影响近似精度和矩阵压缩率的各个参数进行了分析。结果表明：ACA边界元法的计算复杂度和空间复杂度约为 $O(N\log N)$ ，而采用PCA方法可以进一步改进矩阵的压缩率，结合本文提出的迭代求解算法可实现对自由场声辐射的快速预报。

针对有限元-边界元耦合矩阵中各个子块数值特性不同、谱分布特性难以估计的问题，以及ACA边界元法带来的矩阵形式变化，本文在传统迭代求解方法的基础上，研究了基于Schur补的非重叠区域分解算法和Dirichlet-Neumann型重叠区域分解算法。本文针对工程应用中可能影响求解器性能的几何参数、网格规模等因素，通过数值仿真进行了研究。结果表明：利用Schur补在条件数方面的优势，可以显著改善迭代求解器的稳定性和适用范围，而Dirichlet-Neumann型求解器由于松弛因子理论的不完善，尚不能应用于振动声辐射预报的有限元-边界元计算中。

最后，对水下双层圆柱壳体的受激振动与声辐射进行了试验研究，进一步验证了本文计算方法的有效性和可行性。首先建立有限元模型，数值仿真研究了模型在水下辐射声场随距离的衰减规律，确定最小测量距离。试验采用宽频脉冲激励源，利用实测壳体振速分布反演激励幅值作为数值仿真的输入参数。结果显示，本文的方法能够有效地对水下结构的振动声辐射进行预报，同时计算效率稳定，具有一定的工程应用价值。

Abstract

Radiated noise is an important index for evaluating the operational performance and ability of survive of submarines, and also the main factor to destroy the acoustic stealth performance. Prediction of the vibration and sound radiation of underwater structures is an important basis of vibration and noise reduction designing. Therefore, improving the computational efficiency of sound and vibration prediction of large underwater structures without losing accuracy is of great significance for the development of submarine acoustic stealth technology.

The main goal of this paper is focused on the fast sound and vibration prediction of submerged structures, improving methods are researched to overcome the singularity of boundary element matrices at modal frequencies; matrix compressing methods and fast solvers are researched from the view of approximation to overcome the high computational complexity and space complexity; as the FE-BE coupling matrices are complex and difficult to analysis, fast solving methods are researched based on the thinking of domain decomposition.

Coupled formulation of vibration and sound radiation prediction and also its numerical implementation are derived on the basis of structural vibration and sound vibration formulation in frequency domain. An improved CHIEF method was established to overcome the matrices' singularity at specific frequency, the drawback of over determined

equations caused by traditional CHIEF method is also improved and significant improvement of computation efficiency is observed by introducing a LU decomposition solver. Coupled FE-BE method is applied to predict the vibration and sound radiation of typical submerged spherical and cylindrical shell models, our method is then verified by comparing the solution with analytical solution and also the SYSNOISE software, the effect of computation efficiency caused by improved CHIEF method is analyzed carefully.

An adaptive cross approximation (ACA) based fast boundary element method with SVD recompression technique for exterior sound radiation problem is researched, as the memory cost of BE matrices storage reduced, the multiplication of BE matrices and sound pressure and flux vectors is also accelerated. With corresponding iterative solver implemented, the problem of high computational and space complexity is overcome. A principle component analysis (PCA) based domain splitting method was established for arbitrary ratio of length and width in engineering models. Parameters may effecting the accuracy and matrices compression ratio are investigated by numerical experiments. The results shows: the computation and space complexity of ACA-BEM is approximately equal to $O(N \log N)$, a further improvement of compression ratio could achieved by introducing PCA domain splitting method, fast prediction of exterior sound radiation is implemented by the aid of iterative solve algorithm established in this essay.

As the components of FE-BE coupling matrix has different numerical characteristics, its spectral distribution is also difficult to research, on the basis of traditional global iterative methods, Schur complement based non-

overlapping solving methods and also Dirichlet-Neumann overlapping domain decomposition methods are researched also to adapting the form modification of matrices caused by ACA algorithm. Geometrical parameters and also the scale of mesh which may effecting convergence rate of solvers are researched by numerical experiments. The result shows: the stability and scope of application of iterative solvers can be improved significantly by taking advantage of smaller condition number of Schur complement, the Dirichlet-Neumann solver, however, cannot fulfilling the needs of engineering vibration and sound radiation prediction due to the imperfect relaxation theory.

Vibration and sound radiation of submerged and harmonic excited double layered cylindrical shell was investigated by experiment, the feasibility and effectiveness of methods discussed in this essay are further verified. Finite element model of cylindrical shell was established, then the attenuation law of distance and radiation sound field is explored by numerical simulation, a minimal effective measurement distance is also obtained. For the calibration of amplitude of wideband pulse stimulator used in the experiment, experimental vibration velocity distribution is used to calculate the input of numerical simulation. The results shows: vibration and sound radiation of submerged structures can be predicted effectively by method discussed in this essay, whose computation efficiency is stable, can be further applied in engineering conditions.

目录

摘 要

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 结构振动声辐射预报的数值方法概述	3
1.2.1 自由空间声辐射预报数值方法	3
1.2.2 振动声辐射预报方程的求解方法	10
1.3 主要研究内容	12
第2章 水下声辐射预报的有限元-边界元法	14
2.1 引 言	14
2.2 结构振动-声辐射控制方程	15
2.2.1 结构振动有限元方程	15
2.2.2 声场边界元方程	17
2.2.3 有限元-边界元耦合方程	20
2.3 边界元矩阵奇异性问题	20
2.3.1 解决奇异性问题的CHIEF方法	20
2.3.2 改进的CHIEF方法	21
2.4 计算程序设计	23
2.5 数值仿真与结果分析	24

2.5.1 均匀脉动球壳模型的边界元分析	25
2.5.2 有限元-边界元方法验证	33
2.6 本章小结	35
第3章 基于自适应交叉近似的声辐射快速预报	36
3.1 引言	36
3.2 自适应交叉近似理论	37
3.2.1 低秩近似理论	37
3.2.2 交叉近似算法	41
3.2.3 ACA算法的再压缩技术	46
3.3 ACA边界元法	47
3.3.1 基于主成分分析 (PCA) 的求解域分割	47
3.3.2 边界元方程的迭代求解	51
3.3.3 算法误差与效率分析	52
3.4 基于ACA边界元法的声辐射快速预报	62
3.5 本章小结	64
第4章 有限元-ACA边界元法的快速求解	66
4.1 引言	66
4.2 全局迭代方法	67
4.3 非重叠型区域分解算法	68
4.3.1 理论基础	68
4.3.2 计算程序实现	70
4.4 重叠型区域分解算法	72
4.4.1 基本原理	72
4.4.2 最优松弛因子	75
4.4.3 计算程序实现	76

4.5 数值仿真与分析	77
4.5.1 算法精确度	78
4.5.2 迭代收敛速度分析	80
4.5.3 计算效率分析	87
4.6 本章小结	89
第5章 水下大型壳体声辐射预报试验研究	91
5.1 引言	91
5.2 试验原理与方案	92
5.2.1 辐射声功率的测量	92
5.2.2 试验模型与环境	92
5.2.3 试验测量方案	94
5.3.1 仿真模型的建立与网格划分	97
5.3.2 “准远场”有效性分析	100
5.3.3 信噪比分析	103
5.4 仿真与试验数据分析	104
5.5 本章小结	108
结 论	110
参考文献	114
后 记	127

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

潜艇辐射噪声是影响潜艇隐蔽性能的重要指标之一，军事应用上，以声波形式在水下传播的潜艇噪声受到了各国海军的特别重视。各种声纳设备，声自导鱼雷，声学水雷等都把潜艇噪声作为一种重要的目标信息，因此水下噪声是暴露潜艇的主要根源。对潜艇辐射噪声进行有效的预报，对评估潜艇的隐身半径、优化声隐身设计等方面都具有重要的意义。

从产生机理上常将潜艇辐射噪声分为机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声三类，它们同样也构成了潜艇的自噪声。其中辐射噪声是被动声探测装置的信息源，是影响潜艇隐蔽性的重要指标之一。试验表明，低速航行的电力推进潜艇，其机械噪声占到了总辐射噪声的70%。结构噪声的主要来源有潜艇内部主、辅机以及轴系运转通过基座、浮筏传递并激励壳体所引起的外壳振动。此外，由潜艇内部机械振动引起的舱室空气噪声也可以作用于壳体上，激励外壳振动并辐射噪声，但贡献相对较小。

水下结构振动辐射噪声预报的研究方法主要分为解析法和数值法两大类。其中较为经典的解析方法，以数学物理思想为基础，对结构振动及其辐射声场的本质进行深入研究，所得到解也具有较为明确的物理意义，是过去二十年中学者们研究水下壳体声辐射特性的主要手段^[1-5]。但解析法只能适用于平板、圆柱壳、球壳、椭球壳等具有正交几何形状的结构，难以在复杂壳体声辐射的研究中得到推广。而过去六十年间发展起来的数值方法，虽然所得到的解通常难

以给出清晰的物理解释，但对于实际工程中的各种条件具有良好的适应性，能够对带有内部结构的双层壳体辐射噪声做出有效的预报。

典型的水下结构声辐射数值预报分析，根据物理场的特性，需要分别考虑结构振动分析建模、流场的声学建模以及流固耦合三个问题。有限元法对结构分析中常见的板壳^[6,7]、梁^[8,9]等结构等典型结构以及结构间的连接^[10,11]都有成熟的表示方法，可以对结构的激励响应、模态分布等问题进行研究。由于是对求解域的直接离散，有限元法的主要缺点是网格尺寸与波长之间必须满足一定的比例关系，随着求解频率的升高，计算规模随着网格密度的增加而增加；但由于潜艇的隐身性能主要受中、低频段辐射噪声的影响，因此有限元法仍然是研究此类问题的主要手段。

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} |x|^{\frac{n-1}{2}} \left(\frac{\partial}{\partial |x|} - ik \right) p(x) = 0 \quad (1-1)$$

要研究结构振动时，向外部无限水域辐射的声场，首先需要考虑 Sommerfeld 辐射条件^[12]，如式 1.1 所示，其中 x 为场点坐标， p 为声压， k 为波数，Helmholtz 方程的维数 $n=2,3$ 。它确保了水中只有结构本身一个激励源，在无穷远处的边界上，能量是向外传播的。但如果直接在结构外部取一闭合曲面截断无限流场，对式 1.1 进行数值离散并求解，则会导致较大的虚反射，计算结果与实际存在严重的偏差。在过去四十余年中，学者们为解决这一问题进行了大量的研究，所提出的方法各具优势，又各有缺陷，目前仍然有新的方法不断被提出。因此，找到一种方法，在保证计算精度的同时具有良好的计算效率，是实现水下结构的振动与声辐射快速预报的基础。

对流固耦合问题的数值计算方法研究，经历了由解耦、弱耦合到强耦合^[13,14]的发展过程，对于结构振动与声辐射问题而言，其处理方法已经较为成熟。然而目前仍不存在一种求解耦合系统矩阵的普适方法，虽然利用有限元法对结构域进行数值建模已是成熟技术，但不同的声场计算方法所给出的声场矩阵则不尽相同，从而影响了耦合矩阵的特性。例如完全匹配层法可以保持耦合

矩阵的稀疏性，但矩阵的维度也大幅增加，传统边界元法的声场矩阵虽然维度较低，但由于是密集矩阵，计算量巨大，而更为先进的快速边界元法通常不能给出明确的声场矩阵。此外，利用不同方法导出的声场矩阵，其谱分布、正定性、对称性也各有不同。因此，要实现水下结构的振动声辐射快速预报，就必须从所采用的建模方法出发，对耦合矩阵的求解技术进行研究。

1.2 结构振动声辐射预报的数值方法概述

1.2.1 自由空间声辐射预报数值方法

如前文所述，利用弹性结构表面的振动预报声场是声辐射预报研究中的经典问题，近年来学者对该问题的研究主要集中在吸收边界条件法、无限元法和边界元法等。

(一) 人工边界法 (ABC)

大量的数值实验结果表明，利用直接在虚拟边界上施加Sommerfeld辐射条件的方法计算声场会导致严重的虚反射，而声能顺利的透过虚边界这一自然现象又很难用简单的数学表达式进行阐述，寻找简单而有效的数学表达，是此类研究的焦点。1977年，Engquist和Majada^[15]率先提出了基于波动方程旁轴近似的吸收边界，通过令所有的波都在该边界上被吸收，使得截断区域上与原有的外场问题精确等价。以此为代表的低阶吸收边界成了20世纪80年代研究的主流，在众多研究中较有代表性的是廖氏边界^[16,17]和Cerjan等人^[18]提出的利用有效吸收层衰减外行波的海绵吸收层。低阶吸收边界的共同特点是数学表达式较为简单，易于实现，然而在对其进行数值离散时都会遇到困难，采用低阶离散则难以保证计算精度，而要引入高阶插值函数又需要处理高阶偏微分，如何在实现高阶吸收边界的同时避免高阶偏微分，仍有待进一步的研究。

上世纪九十年代中期由Berenger^[19]在对电磁场计算的研究中提出的完全匹配层 (PML) 是吸收边界方法发展中重要的里程碑，通过沿坐标轴人为地将场

变量分解为多个分量，并在各方向上分别引入衰减因子以确保人工边界能够吸收任意角度入射的波，利用多个吸收层迭代的吸收波，该方法同时具备了简洁的数学形式和无反射的特性，对倏逝波也有较好的吸收效果。由于引入了对标量场变量的分裂，因此该方法也被称为分裂式PML（SPML）。1996年，Zhao和Cangellaris^[20]提出，对场变量的分裂并非必要的，并推导了与Berenger形式相等价的非分裂PML（NPML），显而易见的是，NPML降低了人工边界上未知量的数目，也就降低了问题的计算规模，然而在对其进行数值离散的过程中，考虑到近场条件下倏逝波的存在，且入射角变化较大，如果采用单一的衰减因子，就需要使人工边界与辐射源保持一定的距离以保证解的精度，反而增大了整体的计算规模。1996年，Chew等人^[21]引入复数伸展坐标，通过为PML域中的笛卡尔坐标添加虚部来替代介质中的衰减因子，给出了更具一般性的PML表达。在此后的十几年中，PML方法引起了学者的广泛重视，被应用于众多领域。在Chew等人工作的基础上，Liu和Tao^[22]率先提出了Helmholtz方程PML的分裂形式，该方法保留了PML简洁的数学形式，然而在实际应用中必须对边界存在的棱边、角点进行单独的处理，不利于编程实现，也限制了该方法在工程应用中的推广。1997年，在对地震波的研究中，Berenger^[23]提出了基于复频移（complex frequency shift）的PML改进形式（CFS-PML），引入复波数替代阻尼因子，实质上是将复数伸展坐标系中的实轴加以放大，并将虚轴零点平移到了负半轴，改善了NPML对倏逝波的吸收能力。Roden和Gedney^[24]在对CFS-PML加以实现的过程中引入了递归卷积，在保持CFS-PML的非分裂特性同时，能够更有效的截断计算各向异性介质、色散介质、有耗介质问题。

在最近几年，PML方法也正受到国内学者的重视。方能胜^[25]在其博士论文中对PML的不同形式进行了深入的总结，指出虽然这些表达式从数学角度看是存在等价性的，然而在进行了数值离散后，它们的数值稳定性不尽相同，必须分别加以分析。李佩笑等人^[26,27]在总结常规的NPML和SPML基础上，对二者性能以及在声学计算中的适应性进行了研究，指出相比于SPML，NPML占用内存

更少，计算速度更快，在对三维问题的计算中这一优势更为明显，然而NPML对斜入射波和倏逝波具有更好的吸收能力，可以使吸收层更接近结构表面，同等吸收精度条件下，NPML方法对吸收层的厚度也更低，因此在工程应用中仍需根据实际情况选择合适的方法。

总体看来，PML本身显然不具备明确的物理意义，但它从数值角度确保了：

- 1) 截断边界对任意角度入射的平面波的反射系数为零；
- 2) 波在PML中传播时呈指数率衰减。

由于以上两点特性，声波穿透PML后变得非常微弱，再由PML外沿向内反射的波已经可以忽略不计。然而在实际应用中，数值实验表明PML方法的准确性受到匹配层厚度、虚部因子的分布函数等因素的影响；收敛性对频率的变化较敏感，尤其在低频段需要设置更多的匹配层，使得计算量大幅提高。

(二) 无限元法

无限元法的历史可以追溯到1977年，Bettess、Zienkiewicz等人^[28]在对海面上水波的衍射和折射问题的研究中首次提出了infinite element这一名词，其基本思想是沿着波的传播方向建立无限长的带状单元，并构建指数衰减型的形函数以满足Sommerfeld辐射条件。1984年，Bettess等人^[29]提出了映射无限元，也被称为Bettess单元，利用整体坐标和局部坐标之间的奇异映射，将整体坐标系下的无穷远点影射到局部坐标系下的奇点，避免了原有方法对人工设置辐射源点的需求。1998年，Bettess等人^[30]进一步对原有方法进行完善，允许几何影射在单元内、单元间变化，从而使得无限元对较大纵横比求解域中问题的求解精度大为改善。

Astley和Eversman^[31]提出了波包络线法，利用形函数的共轭作为Galerkin法中的加权函数，消除了Bettess映射单元中的不确定积分，使单元矩阵可直接由Gauss积分得出。1994年，Astley和Macaulay^[32]给出了Bettess单元的标准几何影射，使得任何实际的无限单元均可由局部坐标系下的标准单元影射得出，进