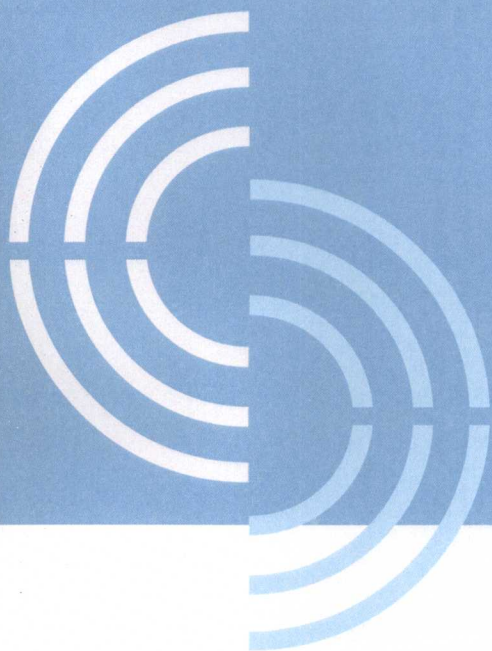


OUHESHENGFUSHHEDELILUNYANJIU

耦合声辐射的 理论研究

朱从云 著



陕西出版集团
陕西科学技术出版社

中原工学院学术专著出版基金资助

耦合声辐射的理论研究

朱从云 著

陕西出版集团
陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

耦合声辐射的理论研究/朱从云著. —西安:陕西科学技术出版社, 2009. 3

ISBN 978 - 7 - 5369 - 4575 - 3

I. 耦… II. 朱… III. 耦合—声辐射测量—理论研究
IV. TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 019983 号

耦合声辐射的理论研究

出版者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话(029)87211894 传真(029)87218236
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
电话(029)87212206 87260001

印刷 西安西法大印刷厂

规格 880mm × 1230mm 32 开本

印张 10 印张

字数 250 千字

版次 2009 年 3 月第 1 版
2009 年 3 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978 - 7 - 5369 - 4575 - 3

定价 30.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

本书首先阐述了薄板结构在不同媒质中的振动与声辐射特性。在满足风机主要性能的前提条件下,研究了风机叶片周期噪声、宽带噪声。针对嵌入式空调室内机的结构特点,运用结构声辐射控制理论,对室内机进行噪声控制。在分析了结构声辐射数值方法的历史及其现状的基础上,详细推导了结构声辐射的边界积分方程,对声辐射的数值计算方法、声辐射的模式理论以及声辐射的灵敏度分析作了深入详细的探讨。在分析了国内外现有研究结构—声学耦合方法的特点基础上,基于间接 Trefftz 理论,发展了一种新的结构—声学耦合分析方法—波函数法。详细推导了板结构、声学空腔和结构—声学耦合系统的波函数模型,并针对该方法中的两个关键问题:波函数序列与多域问题,提出了有效的解决方法;在此基础上,提出了一种基于波函数法的结构——声学灵敏度计算方法。然后应用波函数法,建立了相干双激励下的结构——声学耦合系统波函数模型,从理论上对相干激励下的声场分布规律等进行了研究,并取得了许多有价值的研究成果。这些研究成果不仅在理论上有所突破,而且也能应用于实际生活中。

感谢华中科技大学噪声与振动研究所黄其柏教授,感谢赵志高博士、何雪松博士、李林凌博士对本书所作的重要贡献。没有他们的帮助和支持,本书就不会成文,向他们再一次表示衷心的感谢。

本书注意联系工程实际,可供机械类专业高年级本科生和硕士研究生使用。此外,本书还可供工程技术人员参考。

由于耦合声辐射的理论研究还在发展中,新成果不断发表,涉及面很广,加之作者水平有限,故本书在内容选择、编排和论述方面一定存在不少不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2008 年 12 月于郑州

目 录

第1章 绪论	1
--------------	---

第2章 气固耦合声辐射理论与应用关键技术研究

2.1 引言	6
2.2 薄板在不同媒质中振动及声辐射研究	15
2.2.1 薄板单元各元素的计算	17
2.2.2 媒质的有限元分析	22
2.2.3 薄板与媒质耦合振动分析	23
2.2.3.1 媒质单元与薄板单元相互作用	23
2.2.3.2 考虑相互作用的整个媒质动力平衡方程	27
2.2.3.3 薄板与媒质相互耦合方程式	28
2.2.4 耦合方程组时域求解	29
2.2.5 计及气固耦合薄板辐射声功率	32
2.2.6 实例计算	33
2.3 风机叶片气固耦合特性分析	35
2.3.1 有限元分析风机叶片	37
2.3.1.1 风机叶片有限元单元类型	37
2.3.1.2 叶片的运动方程	37

2.3.2	有限元分析叶片周围气体	38
2.3.3	风机叶片与空气耦合振动分析	40
2.3.4	耦合方程组求解	41
2.3.5	实例分析	42
2.4	风机叶片周期噪声模型研究	43
2.4.1	风机叶片周期噪声数学模型	46
2.4.1.1	气动声学基本方程	46
2.4.1.2	风机叶型方程	47
2.4.1.3	叶片周期噪声数学模型	49
2.4.2	计及气固耦合叶片噪声数学模型	51
2.4.3	噪声模型求解	55
2.4.3.1	叶片旋转噪声数学模型时域解	55
2.4.3.2	计及气固耦合噪声数学模型求解	56
2.4.4	实例计算	58
2.5	风机计及气固耦合声辐射控制	60
2.5.1	室内机噪声理论	63
2.5.1.1	脱落涡噪声	63
2.5.1.2	旋转噪声	64
2.5.1.3	结构振动辐射噪声	64
2.5.1.4	电动机的电磁噪声和机械噪声	65
2.5.2	主噪声源判断	65
2.5.2.1	试验设备及装置	65
2.5.2.2	实验各噪声频谱分析	66

2.5.2.3 主要噪声源	71
2.5.3 实施降噪方案	72
2.5.3.1 确定降噪方案	72
2.5.3.2 实施降噪方案	72
2.5.3.3 分析降噪效果	75
2.6 管道系统计及气固耦合声辐射研究	77
2.6.1 管道气固耦合理论分析	79
2.6.2 计及气固耦合诱发的声辐射	81
2.6.3 管道系统方程	81
2.6.4 管道系统气固耦合频率特性计算	85
2.6.5 实例计算	89

第3章 结构声辐射的理论及数值方法研究

3.1 引言	97
3.2 奇异积分的非等参单元变换方法	114
3.2.1 声学基本方程	114
3.2.2 简谐振动下的 Helmholtz 方程	115
3.2.3 Helmholtz 声学边界积分方程	116
3.2.3.1 内部问题	116
3.2.3.2 外部问题	120
3.2.4 Helmholtz 边界积分方程中系数的计算	122
3.2.4.1 内部问题	122

3.2.4.2 外部问题	124
3.2.5 Helmholtz 声学边界积分方程的统一形式	125
3.2.6 Helmholtz 边界积分方程的离散与非唯一性问题	125
3.2.6.1 Helmholtz 边界积分方程的离散	125
3.2.6.2 Helmholtz 边界积分方程的非唯一性问题与 CHIEF 方法	127
3.2.7 奇异积分的非等参单元变换	129
3.2.7.1 Helmholtz 声学边界积分方程的数值计算	130
3.2.7.2 奇异积分的坐标变换方法	132
3.2.8 数值算例	139
3.2.8.1 脉动球源	139
3.2.8.2 辐射立方体	141
3.3 Helmholtz 边界积分方程的多频计算	143
3.3.1 级数展开的 Helmholtz 边界积分方程	144
3.3.2 数值计算与收敛性分析	147
3.3.2.1 数值计算	147
3.3.2.2 收敛性分析	149
3.3.3 非唯一性问题	151
3.3.4 数值算例	152

3.3.4.1 脉动球源	152
3.3.4.2 振荡球源	156
3.3.4.3 辐射立方体	158
3.4 复杂结构的声辐射解耦及其声辐射效率	161
3.4.1 结构声辐射的边界积分方程	161
3.4.2 解的非唯一性问题与 CHIEF 方法	163
3.4.3 结构的声辐射理论	163
3.4.4 广义特征值问题与结构的声辐射解耦	166
3.4.5 数值算例	168
3.4.5.1 脉动球源	168
3.4.5.2 辐射立方体	174
3.4.5.3 车腔结构	180
3.5 结构声辐射的灵敏度分析	183
3.5.1 结构振动的有限元分析	183
3.5.2 薄板的声辐射理论	184
3.5.3 结构声辐射的灵敏度分析	186
3.5.4 数值仿真	188

第4章 基于波函数法的耦合声辐射的系统理论研究

4.1 引言	200
4.1.1 声固耦合问题现有研究方法的优缺点比较	201

4.1.2	Trefftz 方法	205
4.1.3	结构—声学灵敏度分析	206
4.2	基于间接 Trfftz 的波函数法理论	209
4.2.1	非耦合平板问题	212
4.2.2	非耦合的声学空腔内问题	220
4.2.3	结构—声学耦合系统内问题	233
4.3	多域问题	247
4.3.1	平板结构多域问题	248
4.3.2	声学腔体多域问题	255
4.3.3	结构—声学耦合系统多域问题	264
4.4	结构—声学耦合系统设计灵敏度分析	270
4.4.1	平板结构设计灵敏度分析	272
4.4.2	声学设计灵敏度分析	279
4.4.3	结构—声学设计灵敏度	284
4.5	相干激励下空腔声场分布规律研究	290
4.5.1	基本理论	291
4.5.2	结构—声学耦合模型	294
4.5.3	数值算例和讨论	296

第1章 绪 论

结构声辐射多年以来,一直是许多研究者研究的一个热点。目前,国内外声源的声辐射的研究方法,有理论、实验和数值计算三种。理论研究方法,目前仍局限于比较简单的理论模型和理论方法,且只能对简单的典型声源用解析法建立其辐射声场,然后用相应的特殊函数来表示;而一般形状物体的声辐射场则需要用数值法进行求解。常用的数值法有球函数匹配展开、有限差分、有限元、边界积分方程法、边界元法和无限元法等。球函数展开方法的优点是计算简单,缺点是对于长短比较大的物体导出的阻抗矩阵严重病态,收敛性差,故实际应用不多。20世纪50年代,有限元方法兴起,该方法被应用于声辐射问题的分析计算中。有限元方法把有限差分法的离散改造成成为有限元离散,把 Ritz 法的试函数近似换成插值函数近似,以变分原理作为推导的根据,并充分运用计算机的高速计算能力,从而开拓了现代数值方法的广阔领域。但有限元方法在声辐射分析计算中也有不足之处,对于工程中常见的无限域中的外部声辐射问题,有限元方法的剖分截止边缘难以确定,并会由此带来计算误差。为此,波包有限元方法、无限波包法被引入研究声辐射问题,但是这些方法的研究

尚在起步阶段,在声辐射计算中应用还不多见。

实际上,对很多工业产品结构,都可将其视为有限大尺寸的板结构或其组合形式。当板结构在外力激励下,会产生振动,进而在周围媒质中形成声辐射。对于板结构的振动,人们已经对其进行了大量研究。Leissa 在前人研究基础上,总结了各种板结构的模态和频率特性;这些研究成果,为研究板声辐射奠定了坚实的基础。由于板结构振动而产生的声辐射,对于低噪声产品设计有重要意义,人们对其进行了深入细致的研究。对于放置在无限大刚性障板中的板结构,其辐射声场利用 Rayleigh 积分可以近似算得。早期的研究工作,通常将板结构的边界条件假设为简支的情况,重点研究板结构的声辐射效率。对板结构的单阶模态的声辐射效率,通常将之称为模态声辐射效率。在 20 世纪 60 年代,Maidanik 首次给出了在整个频域内的模态声辐射频率近似求解公式。Wallance 利用远场声辐射声强,近似提出了矩形板结构模态声辐射效率的积分表达式,揭示了无限大刚性障板中矩形板结构的声辐射特性。Gompert 对一般边界条件下的矩形板结构模态声辐射做了进一步研究。Heckl 则另辟新径,在波数域用 Fourier 变换分析了板声源的声辐射机制。在大量研究的基础上,Fahy 对这些成果进行了总结。Leppington 和 Levine 提出一种将声功率的四重积分转化为单重积分的方法,大大提高了数值计算的精度。对于简支边界条件下的板结构声辐射,较易计算求得,并产生了大量的研究成果。为了研究板结构在不同边界条件下的声辐射特性,人们在研究中探索、提出了很多新的求解方法,如 Ritz 法、级数法、Galer-

kin 法、Rayleigh-Ritz 法、有限元法等。对于板结构在弹性边界条件下的振动特性以及声辐射特性,人们也获得了一些研究成果。

在产品早期设计过程中,由于设计的不确定性,使得板结构在设计中的几何形状可为任意形状,其边界条件也可为任意边界。为在产品早期设计阶段考虑结构振动和声辐射问题,研究者开始对这类问题进行研究。为解决结构任意边界条件的问题,Lundquist 和 Stowell 最先提出了一个简支矩形板结构,即当其两个对边被弹性支撑时,板结构的振动和屈曲问题。从此,研究者为解决此类问题,进行了大量的研究。Bartlett 研究了一个圆盘形板结构——当其部分简支部分固支时的振动问题。Ota 和 Hamada 利用沿分散扭矩方程得到了一边局部固支的正方形板结构的特征频率。Hamada 还研究了——简支矩形板结构当被部分固支时的屈曲问题。Keer 和 Stahl 用第二类 Fredholm 积分方程对矩形板结构被部分固支时的振动和屈曲问题进行了研究。Mizusawa 和 Leonard 利用样条单元法研究了局部简支的矩形板和多边形板的振动问题。Liew 和 Hung 等提出了一种区域离散的方法,对复杂边界进行处理。在研究中,他们提出了一种主区域加权余量法,以保证在相邻区域的板结构变形以及高阶微分的连续性,成功地求解了矩形板结构在不同边界条件下的特征频率。最近,Liu 和 Liew 利用微分方法分析了不连续边界板结构的振动。这些研究为解决任意边界条件板结构奠定了基础,但对更一般情况下的板结构和边界条件仍研究不够。

加筋板结构形式在机械产品设计中是另一类重要的

结构形式,因此其结构声辐射就成为大量研究者的一个研究热点。对加筋板结构,解析方法对振动响应以及辐射声的求解通常有很大的限制,近似的统计方法也只适用于高频。在对加筋板振动问题的众多研究中,研究者主要采用的方法是 Rayleigh-Ritz 法和有限元法。在早期的研究中,研究者多采用 Rayleigh-Ritz 法,如 Wu、Laura、Bhat、Gutierrez 等人的研究,他们分别研究了薄板的弯曲变形以及加强筋的弯曲和扭转变形。另外一些研究者,如 Liew、Xiang 和 Berry 等,利用 Mindlin 板模型,将旋转惯量和横向剪切计入计算中,更好地分析了加筋板结构的弯曲、扭转和横向剪切变形等。在这些研究中,除矩形板结构外,研究者也研究了其他几何形式的板结构,如加筋多变形板和加筋扇形板等。这些研究结果为解决加筋板振动提供了方法和手段,也为求解此类板结构的辐射声奠定了基础。在加筋板振动问题研究的基础上,Mace 和 Mead 等对其声辐射问题进行了初步研究。随后,Berry 等研究了无限大、有限大以及周期性等不同形式的加筋板结构。在这些研究中,其试函数均为在整个加筋板范围内的多项式函数。但这种试函数在实际求解中存在一些限制,譬如对刚度较大的加强筋,试函数难以快速重建以适应加强筋的振动响应,从而使得其应用受到限制且求解也不准确。

另一方面,由于有限元法的理论基础是其在结构全局的离散和在局部的差值函数,因此,单元尺寸限制了有限元法在低频范围内的应用。为了解决有限元法的这种缺陷,研究者提出了一些替代方法。Koko 等提出一种超单元方法对加筋板自由振动进行建模,这种方法允许对一部

分小尺寸的有限单元用一个大尺寸的单元替代,特别是对相邻加强筋之间的单元。Chen 等利用有限样条和有限板条混合的方法,对加筋板进行离散,并用有限样条和板条作为试函数。Cote 利用 p-version 有限元法求解几种板结构的声辐射问题,其中包括加筋板的振动;在 p-version 有限元法中,对结构进行离散的单元尺寸保持不变,其求解通过不断增加多项式试函数的次数并直到达到收敛为止。随着计算机技术的发展,p-version 有限元法与传统有限元法相比,其在中频范围内具有明显的优点。Bardell 提出了一种分层有限元法来求解板结构的自由振动问题。分层有限元法最明显的一个优点是,对于给定差值次数的矩形方程,可以形成更高差值次数的矩阵方程。在分层有限元法中,Bardell 所用的差值函数是基于完整 Legendre 正交多项式提出的。这种差值函数后来也被应用于周期性加强筋板结构的自由振动求解中。近来,Beslin 等提出一组分层三角函数来预测具有任意边界条件的弯曲薄板振动的高阶模态,这种试函数与 Bardell 所提出的试函数相比,在更宽的频率范围内具有更好的稳定性。

虽然板结构声辐射与结构振动响应关系很大,但却很复杂。研究表明,不是简单地改变整体或者局部的振动幅值或者相位就能得到最优控制。由于板结构声辐射的复杂性,有必要研究揭示噪声辐射和传递以及测量、评价的方法和规律。

第2章 气固耦合声辐射理论与应用关键技术研究

2.1 引言

流体就是液体及气体的统称。对于气体,分子间相互作用力较弱,无规则运动剧烈,易于变形和压缩;对于液体,其特征介于固体与气体之间,易变形,不易压缩。他们都满足伯努力原理,即流体的速度越大,压力反而越小,并在一定的条件下气体与流体可以发生相互转化。尽管液固耦合与气固耦合中因液体、气体性质的差别,它们的求解方法、计算精度、应用领域等还是有差别,但是实际中的液固耦合和气固耦合,一般都称为流固耦合。流固耦合力学是一门交叉性的科学,它涉及流体力学、固体力学、动力学、计算力学等学科。流固耦合现象遍及土木、航空航天、船舶、动力、海洋、石化、机械、核动力、地震地质、生物工程等领域。但是,人们对流固耦合现象的早期认识源于飞机工程中的气动弹性问题——气固耦合,即本章所研究的对象。据专著记载,Wright 兄弟和其他航空先驱者都曾遇到过气动弹性问题,他们主要由直观上来解决问题,并没有认识到物理本质。1903 年,Langley 的单翼首次有动力飞行试验因机翼断裂而坠入 Potomac 河中。10 年后,G.