



Virtual.Lab Acoustics

声学仿真计算 从入门到精通

◎ 詹福良 徐俊伟 编著



西北工业大学出版社

013045543

TB535-39
02



LMS 官方认证培训教材

Virtual. Lab Acoustics

声学仿真计算从入门到精通

詹福良 徐俊伟 编著



Φ

TB535-39

02



北航 C1653837

西北工业大学出版社

013042243

【内容简介】 本书重点介绍的 LMS Virtual. Lab Acoustics 软件是专门从事噪声分析的 CAE 软件。书中详细讲解了声学有限元方法(包括无限元、PML 和最新的 AML 技术)和声学边界元方法(包含快速多极边界元)。在传统振动声学问题的基础上,本书还重点介绍了气动噪声、随机声振、时域声学计算以及声线法等全新内容。

本书基本涵盖了声学数值计算的全部方法,内容充实,结构清晰,并且以具体的算例和详细的步骤讲解了各种计算方法的流程,对象涉及汽车、船舶、航空航天以及家电等行业。

本书适合于高校相关专业师生,汽车、船舶、航空航天、家电等领域的工程技术人员以及其他关注噪声问题的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通/詹福良,徐俊伟编著. —西安:西北工业大学出版社,2013. 5

ISBN 978 - 7 - 5612 - 3669 - 7

I. ①V… II. ①詹… ②徐… III. ①噪声控制—计算机仿真—应用软件 IV. ①TB535 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 091522 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www. nwpup. com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:30.5

字 数:744 千字

版 次:2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价:78.00 元(含光盘 1 张)

序

声学是无处不在的物理现象,可以说凡有人类活动或足迹的地方,就有声学相关的问题和需求存在,比如:日益快捷和舒适的交通工具(飞机、汽车、铁路、船舶),与人们生活息息相关的办公和家用电器(楼宇、房间、冰箱、洗衣机、吸尘器),各类音响设备(电视、音响、多媒体设备、耳机),专业的演出与运动场所(剧场、舞台、音乐厅、足球场),代表尖端技术的空天探索(火箭导弹发射、载人航天、空间站、外太空探测),军用舰船(水声研究、声呐探测、舰船隐身、敌我识别、次声武器),以及各类能源和工程机械(风能、核电、热电、电力输送、建筑机械、化工机械、矿机、农机)等诸多领域,都提出了大量的声学 and 声学相关问题,并且,随着各领域研究的不断深入和技术进步,具有更高挑战性的声学研究课题也层出不穷。众所周知,对这些问题的研究,仅仅依靠试验验证、试误纠错的方法和流程已经远远不能满足现代工程的需求,而基于物理和数学模型的虚拟仿真分析技术正在扮演越来越重要的角色,并在研究的广度和深度方面发挥了越来越重要的作用,甚至已经成为现代科技和工程领域不可或缺的依赖性支撑技术。声学仿真也不例外。

声学是复杂的波动现象,其空间传播和各类吸收、反射、衍射、干涉等边界条件的复杂特性决定了对其进行研究的艰深性,无论采用测试或仿真的技术手段均如此。声学现象或者声场分布无法直观想象出来,因此声学仿真具有抽象性特点。同时声学研究离不开对声源的有效模拟,典型的声源可以是结构的振动,也可以是流体的运动。要研究或解决好声学现象,必须首先探究好结构和流场的问题,因此声学仿真还具有综合性特点。随着结构有限元 FEA 和计算流体动力学 CFD 技术的日益成熟,历经几十年的发展积累,声学仿真分析技术也逐步走向成熟和实用,并正在人类科技进步的进程中发挥着愈加重要的作用。本书就是在这样一个大的背景下应运而生的,相信本书的出版能为振动声学和流体声学相关的研究与应用拂入一缕清风,为广大声学工作者及声学工程爱好者开启一扇通向声学工程别样风景的大门。

LMS 公司作为全球最著名的振动和噪声研究及工程服务的专业厂家,在声学仿真领域一直享有盛誉。

从 1995 年收购 NIT 公司的 Sysnoise 软件开始,LMS 一直致力于振动和声学仿真软件的开发与工程应用,并被业界广泛认可,成为声学仿真技术的业界引领者。

早在 2003 年的 Sysnoise 5.6 版本中,除了经典的振动声学仿真,LMS 还最先推出了成熟的流体声学解决方案,并很快被诸多工业用户接受,成为振动噪声和气动噪声分析的首选专业软件工具。



从 2000 年开始,为了适应日益复杂的工程仿真分析的平台化和集成化需求,并彻底打破 CAD 建模与 CAE 分析之间的数据和流程壁垒,LMS 实施了虚拟仿真平台整合战略,将 Sysnoise 技术核心、混合建模技术核心 Gateway,以及多体动力学技术核心 DADS、疲劳技术核心 FALANCS 和数值优化核心 Optimus 完全无缝集成在统一的 LMS Virtual Lab 平台,使得声学仿真技术从求解器核心、建模分析流程、前后处理、流程自动化等方面都取得了飞速的发展和长足的进步。

特别是在 2008 年之后,从 Virtual Lab 9 开始,LMS 的声学仿真又接连取得了诸多突破性的创新技术成果。典型的如:①快速多极边界元技术 FM-BEM,这是解决诸如飞机、汽车、船舶等大型外场声学问题的唯一有效方法,该技术与 EADS(空中客车公司的母公司)联合开发,并经过了空中客车、庞巴迪、通用汽车等著名国际公司的工业应用验证;②时域边界元技术 TD-BEM 是目前唯一稳定可靠的时域边界元技术,把边界元易用性和时域声学完美结合,是解决开、关车门声品质,发动机喷油噪声,轮胎噪声,水下声学信号处理等瞬态声学问题的最适用技术;③自动完美匹配层技术 FEM-PML/AML,该技术在大大缩小有限元模型规模、极大加快计算速度的同时,还允许一个模型中存在多个 FEM-PML 区域(而无限元 IFEM 只能有一个且必须包含整个 FEM 网格),从而极大地拓展了声学有限元技术的适用范围(比如复杂隔板隔声、无限管路的噪声模拟,同时考虑进气和内外涵道的航空发动机噪声模拟等)。LMS 独到的 FEM-PML/AML 技术在波音公司、IFE、克莱斯勒、PSA、卡特彼勒、中国商用飞机有限责任公司等行业用户中都已经得到广泛验证和应用;④最新的流体声学技术 Aero-Acoustics,同时支持边界元和有限元方法,针对不同应用给用户最大的选择空间,无论是从模型的流体数据轻量化上,还是从求解速度与精度上都创造了最高记录;⑤独有的混合建模技术 Virtual Lab NVM,真正将试验和仿真的优势有机结合,是解决复杂 NVH 问题的关键和精髓。混合仿真的最大优点是准确,通过把仿真无法模拟准确的部件(如车身内饰)用试验结果替代,可以减少误差;其次,使用混合仿真的综合求解器比单一的有限元求解计算速度更快。因此,混合仿真技术是解决实际工程问题最有效的方法。从当前 CAE 软件的发展趋势来看,如果缺乏工程实际能力而去空谈或者盲目夸大仿真软件本身的个别特征可能是一种误导,会直接影响对声学工程问题的精确分析和有效解决。

至今,随着最新版的 Virtual Lab 11 的成功发布,可以说 LMS 的声学仿真产品无论从技术的先进性、完整性、易用性,到求解器核心的速度精度、求解规模、数值稳定性和可靠性,以及解决实际问题的宽泛性、有效性等各个角度,都把声学仿真分析技术带入了一个崭新的阶段,其对声学仿真的最新潮流和发展方向的引领为全球所公认。

参与本书编写的作者都是在声学仿真领域活跃多年的一线技术人员,在技术和工程应用方面都有多年的经验,涉猎的应用领域也相当广泛,保证了本书具备足够的专业知识和工程经验背景。因此相比于《Virtual Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例》(李增刚,詹福良,国防工业出版社,2010),本书融入了更多的实际工程元素。当然作为一本教材,作者虽尽力去覆盖所有的功能点、知识点以及应用技巧,但限于篇幅也很难做到面面俱到,希望本书能够确



实起到抛砖引玉的效果,引导广大用户在各自的领域里面做出更大的成绩。期望广大读者阅读本书时能重点关注到其中解决问题的思路和方法,并能从中受益。

更多的技术细节和深入探讨,欢迎随时联系 LMS 中国团队。通过我们技术精湛的团队和专业服务,相信您能够有更多的收获。我们也将不懈地致力于将最新最优的声学技术及其应用及时介绍给关注声学技术的读者,更好地服务于广大中国用户。

郭继忠

(LMS 中国区总经理)

前 言

随着经济和科学技术的不断发展,人们的生活水平越来越高,人类在享受现代文明所带来的快捷方便的同时,对环境也提出了更高的要求。人们希望能在一个更加安静祥和的环境中工作和生活,但是由于各种机器功率的不断提高,相伴而来的就是噪声污染日益普遍和严重。噪声对人们的生理和心理都有严重的影响,较强的噪声持续作用,可以使人的听力下降,严重时导致永久性听力衰减。

在传统的设计理念中通常对噪声问题不予重视,导致在产品开发完成后才发现噪声过大,失去竞争优势甚至无法满足法规而被迫整改。而此时由于开发成本、时间以及设计空间等的限制,往往只能通过局部修补来挽救,造成产品开发后期的代价高昂和周期拖延,更关键的是失去了参数分析和优化的空间,无法推出性能最优的产品。

为了使工业产品更加安静,为了将声音品质作为竞争优势,为了达到日趋严格的噪声排放法规要求,在现代工业中,对于新产品的开发在设计阶段就应该考虑到噪声的问题,这样可以提高产品的市场竞争力,为企业带来良好的经济效益;对用户而言,可以更好地享受生活乐趣,提高生活质量。

本书介绍的 LMS Virtual. Lab Acoustics 软件是全球领先的专门用于噪声分析的 CAE 软件。众所周知,很多年前的 LMS Sysnoise 软件被广大工程技术人员广泛接受并深刻掌握,为解决振动噪声问题带来了极大方便。随着技术的进步和 CAE 软件的平台化发展需求,LMS 开发出了新一代的多功能属性虚拟仿真平台软件 LMS Virtual. Lab,其中的声学模块 Virtual. Lab Acoustics 即基于强大的 Sysnoise 软件发展而来,并已经完全取代和超越了 Sysnoise 的原有地位与技术水平。

LMS Virtual. Lab Acoustics 从诞生伊始,多年来一直是全球声学领域排名第一的仿真软件,同时提供最先进的振动声学和流体声学仿真功能,是全球公认的业界标准。LMS Virtual. Lab Acoustics 不仅完全继承了 Sysnoise 的强大功能,还极大发展了最先进的新技术,例如快速多极边界元 FM - BEM 技术、有限元完美匹配层 FEM - PML/AML 技术、基于 BEM 和 FEM 的流体声学 Aero - Acoustics 技术、快速内饰 Fast Trim 技术、时域边界元 TD - BEM 技术、自适应声学单元 FEMA0 技术等。同时,该软件还提供了最广泛的运行平台支持,如 64 位操作系统、多 CPU 多内核架构、Linux 操作系统、集群计算、HPC 高性能计算等。通过这些核心技术,Virtual. Lab Acoustics 声学软件既覆盖常规应用,例如结构声辐射、内场声学、声振耦合、流体声学、水下声学等,也提供特殊声学工程问题的专门解决方案,例如发动机升速、随机声振、快速内饰、高频问题等。可以说 Virtual. Lab Acoustics 从振动噪声到流体噪声,从声



辐射到声振耦合,从部件级到系统级,从低频到中高频,从前处理、求解器到结果的后处理,建立了全球首个端对端的声学性能工程模拟环境,通过虚拟模型进行产品的概念开发和设计改进,再到基于试验的验证,提供了最完整的声学分析相关解决方案。

LMS Virtual Lab 操作简便,使用 LMS Virtual Lab Acoustics 的用户不必是声学方面的专家,从事噪声分析工作的一般技术人员都可以精通掌握 LMS Virtual Lab Acoustics。

本书的编写充分考虑了上述的软件特点,内容全面翔实,由浅入深,循序渐进,注重理论与操作相结合。全书对声学有限元计算、声学边界元计算、声振耦合计算、无限元方法、FEM-PML 方法、FEM-AML 方法、快速多极边界元、气动噪声、随机声学、时域声学以及 ATV/MATV 方法、VATV 方法、声线法等都有详细介绍,并且都安排了具体的算例让读者进行操作学习。为了便于讲解及读者学习,本书附带案例光盘一张。

在本书的编写过程中,要特别感谢 LMS 中国区总经理郭继忠先生、技术总监石银明博士、销售总监刘印章先生以及西北区销售工程师张伟先生的大力支持。另外,本书的第一章、第六章编写以及算例校核工作,都有 LMS(北京)技术工程师张伟先生的辛勤付出。同时也要感谢西北工业大学动力与能源学院郭军丽女士在算例校核方面所做的工作,以及在本书出版过程中 LMS 市场部经理乌蒙女士的协调努力。最后,要特别感谢西北工业大学动力与能源学院吴亚锋老师、李江红老师的鼓励和帮助,感谢徐俊伟的父母以及未婚妻杨紫娟女士的理解和支持。

衷心希望本书能对广大学生和工程技术人员有益。但是由于水平有限,书中难免存在一些不足,肯请各位读者批评指正。

编著者

2013 年 1 月

目 录

| | |
|--|-----|
| 第 1 章 LMS Virtual. Lab Acoustics 基础 | 1 |
| 1.1 声学基本概念 | 1 |
| 1.2 声学基本方程及声学边界条件 | 4 |
| 1.3 声学数值计算方法简介 | 6 |
| 1.4 LMS Virtual. Lab 平台简介及基本操作 | 12 |
| 1.5 本书内容结构 | 21 |
| 第 2 章 声学有限元的应用 | 22 |
| 2.1 单扩张腔消声器传递损失计算 | 22 |
| 2.2 Sullivan & Crocker 消声器传递损失计算 | 41 |
| 2.3 考虑流动影响的多腔体消声器传递损失计算 | 62 |
| 2.4 考虑温度梯度的消声器传递损失计算 | 74 |
| 2.5 阻抗复合式消声器传递损失计算 | 87 |
| 2.6 封闭空间声学模态及声学响应计算 | 104 |
| 2.7 耦合模态分析 | 109 |
| 2.8 汽车内声场声振耦合计算 | 116 |
| 2.9 挡风玻璃隔声量计算 | 129 |
| 2.10 船舱内柴油发动机噪声辐射计算 | 139 |
| 2.11 考虑汽车内饰的汽车内声场计算 | 151 |
| 2.12 阻抗管法测量声学材料吸声系数 | 163 |
| 2.13 涡轮增压器涡壳辐射声场计算 | 171 |
| 2.14 潜艇散射声场计算 | 190 |
| 2.15 潜艇辐射声场计算 | 196 |
| 2.16 涡轮增压器多腔体消声器传递损失计算 | 218 |
| 2.17 航空发动机风扇辐射噪声计算 | 229 |
| 第 3 章 声学边界元的应用 | 239 |
| 3.1 直接边界元法计算铝板振动噪声 | 239 |
| 3.2 直接边界元法计算车内声场及板块贡献量 | 253 |
| 3.3 间接边界元法计算引擎盖振动噪声 | 261 |



| | | |
|-------------|-----------------------------------|------------|
| 3.4 | 汽车防火墙振动与车内声场声振耦合计算 | 270 |
| 3.5 | 扬声器辐射声场计算 | 284 |
| 3.6 | 压电换能器(声呐)声场计算 | 293 |
| 3.7 | MATV 方法计算发动机辐射噪声 | 299 |
| 3.8 | 发动机模态扩展计算 | 315 |
| 3.9 | 声学逆计算 | 326 |
| 3.10 | 快速多极边界元计算发动机辐射声场 | 332 |
| 第4章 | 气动声学 | 336 |
| 4.1 | HVAC 管道气动噪声计算 | 338 |
| 4.2 | 圆柱翼型干涉流场气动噪声计算 | 350 |
| 4.3 | 轴流风扇气动噪声计算 | 360 |
| 4.4 | 平板风噪声计算 | 373 |
| 4.5 | 汽车后视镜气动噪声与车窗风噪声计算 | 384 |
| 4.6 | 射流气动噪声计算 | 408 |
| 第5章 | 随机声学 | 415 |
| 5.1 | 机舱壁板隔声量的计算 | 416 |
| 5.2 | Corcos 模型计算飞机湍流边界层激励对机舱内的噪声 | 422 |
| 5.3 | 孔板随机声振及声疲劳计算 | 430 |
| 第6章 | 时域声学有限元及边界元的应用 | 439 |
| 6.1 | 轮胎噪声的时域声学有限元计算 | 439 |
| 6.2 | 空气夹层的声波传播计算 | 444 |
| 6.3 | 平面波瞬态声场计算 | 448 |
| 6.4 | 倒车雷达时域声学计算 | 454 |
| 第7章 | 声线分析法的应用 | 462 |
| 7.1 | 汽车防火墙对车内声场的 ATV 计算 | 462 |
| 7.2 | 声线法计算轿车内声环境 | 469 |
| 参考文献 | | 477 |

第 1 章 LMS Virtual. Lab Acoustics 基础

1.1 声学基本概念

从一般意义的声学概念上讲,声的传播由三要素组成:声源、声传播路径和声接收者。如图 1.1 所示。

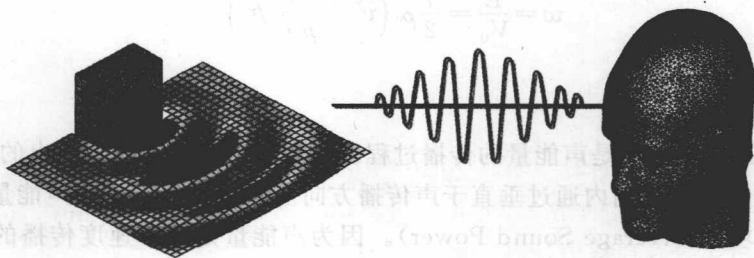


图 1.1 声传播示意图

从声源的产生来分类,可以分为振动声源和流体声源。振动声源,一般是由结构振动引起的结构表面流体的压力脉动;流体声源,一般是由流体流动而引起的流体自身的压力脉动。

从传播途径上,可以将传播介质分为流体、固体、流体和固体混合等。当既有流体又有固体时,将涉及声固耦合,在流体区域满足声学方程,在固体区域满足结构振动方程。

从传统意义上来讲,声音的接收者一般为人,鉴别声音的大小和频率(根据人的感官,这里又将声学频响用计权的方式来表示);当然声音的接收者也可以是动物、声学传感器等。

下面介绍几种常见声学量的基本概念:声压,声波的能量,声功率和声强,声压级、声强级和声功率级,计权声压。

1.1.1 声压

在流体中,静止状态时的压强为 p_0 ,在受到外界扰动后,压强 p_0 变化为 $p(t)$,扰动引起的逾量压强为 $p'(t)$,即为声压,表达式为 $p'(t) = p(t) - p_0$ 。声压是衡量声学特性的一个重要物理量,下面将要介绍的声强级、声压级和声功率级等,都是以它作为基础进行推导或换算得到的。

1.1.2 声波的能量

某一 $dx dy dz$ 微元体初始体积为 V_0 ,初始压强为 p_0 ,密度为 ρ_0 ,由于受到声扰动,该微元体的振动速度为 v ,压强为 $p_0 + p'$,体积为 V ,该微元体的动能和势能分别为



$$E_k = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 v^2$$

$$E_p = - \int_{V_0}^V p' dV$$

由于 $m = \rho V$, 可以得到 $d\rho/\rho = -dV/V$, 由于 $\rho = \rho_0 + \rho'$, $V = V_0 + dV$, 在小振幅条件下 $\rho' \ll \rho$, $dV \ll V_0$, 有 $d\rho'/\rho_0 = -dV/V_0$, 由方程两边微分得到 $dp = c_0^2 d\rho'$ (c_0 为声速), 因此 $dV = -\frac{V_0}{\rho_0 c_0^2} dp$, 则势能为

$$E_p = - \int_{V_0}^V p' dV = \int_0^p \frac{V_0}{\rho_0 c_0^2} p dp = \frac{V_0}{2\rho_0 c_0^2} p^2$$

微元体内的总能量为

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 \left(v^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2 \right)$$

通常定义单位体积的声能量为声能密度 (Sound Energy Density), 即

$$w = \frac{E}{V_0} = \frac{1}{2} \rho_0 \left(v^2 + \frac{1}{\rho_0 c_0^2} p^2 \right)$$

1.1.3 声功率和声强

声波的传播过程实际上是声能量的传播过程。声源在单位时间内辐射出的能量称为声功率 (Sound Power), 单位时间内通过垂直于声传播方向上面积为 S 的平均声能量, 称为平均声能量流或平均声功率 (Average Sound Power)。因为声能量是以声速度传播的, 所以平均声功率等于声场中面积为 S , 高度为 c_0 的圆柱体内所包含的平均声功率, 即

$$W = w c_0 S$$

声强 (Sound Intensity) 是指在垂直于传播方向的单位面积上通过的平均声能量流, 即

$$I = \frac{W}{S} = w c_0$$

需要注意的是, 声强是有方向的, 即

$$I = I_+ + I_-$$

式中, I_+ 表示正向声强; I_- 表示负向声强; 如果前进波与反射波相等, 那么 $I = 0$, 形成驻波, 这也是消声主动控制的基本原理。

1.1.4 声压级、声强级和声功率级

由于人耳能听到的声强的范围非常大, 用声压或者声强的绝对值来衡量声音的强弱很不方便。所以, 人们普遍采用对数标度来度量声压、声强和声功率, 分别称之为声压级、声强级和声功率级。

声压级 (Sound Pressure Level) 定义为声压的有效值与基准声压的有效值之比, 然后取对数, 即

$$L_P = 20 \lg \frac{P_e}{P_r}$$

式中, P_e 为测得的声压; P_r 为参考声压, 通常取 $P_r = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 是人耳对 1kHz 空气声所能感到的最低声音的声压。



声强级(Sound Intensity Level)定义为声强和参考声强之比的常用对数的10倍,即

$$L_I = 10 \lg \frac{I_c}{I_0}$$

式中,基准声强 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$,为可听的最小声强。

声功率级(Sound Power Level)定义为声功率与基准声功率之比的常用对数的10倍,即

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0}$$

式中,基准声功率 $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ 。

声压级、声强级和声功率级之间的基本关系如下:

$$L_I = L_p + 10 \lg \frac{\rho'_0 c'_0}{\rho_0 c_0}$$

$$L_w = L_I + 10 \lg S$$

$$L_w = L_p + 10 \lg S + 10 \lg \frac{\rho'_0 c'_0}{\rho_0 c_0}$$

式中, $\rho'_0 c'_0$ 为参考状态的空气特性阻抗,通常取 $400 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$,一般情况下 $\rho_0 c_0$ 接近 $400 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$,因此 $L_I \approx L_p$ 。

1.1.5 计权声压

计权,用通俗的语言讲就是滤波器根据不同的频率,对各个频率的幅值进行衰减或者增加。声压的计权有A,B,C,D等级。A计权是最贴近人耳感觉的,是最常用的计权方式。假设不对源声音进行A计权,那么计算得到的声压级的值和我们耳朵感觉的有时候会不一样。三者的主要差别是对噪声低频成分的衰减程度,A计权衰减最多,B计权次之,C计权最少。A计权声级由于其特性曲线接近于人耳的听感特性,所以目前世界上噪声测量中应用最广泛的一种,B计权和C计权已逐渐不用。图1.2所示为声压计权曲线图。

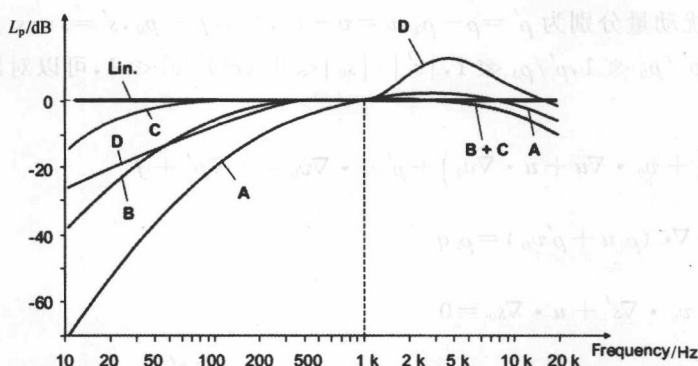


图 1.2 声压计权曲线图

A 计权:40 Phone 等响曲线的翻转。

B 计权:70 Phone 等响曲线的翻转。

C 计权:100 Phone 等响曲线的翻转。

D 计权:专用于飞机噪声的测量。



1.2 声学基本方程及声学边界条件

1.2.1 声学方程

声学方程的任何一种形式都可以从流体的连续方程、运动方程、能量方程、物态方程推导而来。通过对流体方程进行线化和不同的假设可以得到不同形式的声学方程。下面从流体欧拉方程进行线化和假设来推导经典的声学波动方程。

欧拉方程组

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + f & \text{连续方程} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho + \rho \cdot \nabla v = \rho q & \text{运动方程} \\ \frac{\partial s}{\partial t} + v \cdot \nabla s = 0, c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s & \text{物态方程} \end{cases}$$

式中, ρ, v, p, s 分别表示流体的密度、速度、压力及熵, 而 f, q 分别表示外部作用于流体的力和质量源。

对于定常流动, 即无任何形式的非定常扰动情况下, 方程组将转化为以下形式:

$$\begin{cases} \rho_0 v_0 \cdot \nabla v_0 = -\nabla p_0 \\ \nabla \cdot \rho_0 v_0 = 0 \\ v_0 \cdot \nabla s_0 = 0 \\ v_0 \cdot \nabla p_0 = c_0^2 v_0 \cdot \nabla \rho_0 \end{cases}$$

式中, $\rho_0, v_0, p_0, s_0, c_0$ 分别表示定常流动的密度、速度、压力、熵及声速。

假定流场的扰动量分别为 $\rho' = \rho - \rho_0, u = v - v_0, p' = p - p_0, s' = s - s_0, (c^2)' = c^2 - c_0^2$, 并满足 $|u|/c \ll 1, p'/p_0 \ll 1, \rho'/\rho_0 \ll 1, |s'|/|s_0| \ll 1, (c^2)'/c_0^2 \ll 1$, 可以对以上的方程组进行线化, 得

$$\begin{cases} \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla u + u \cdot \nabla v_0 \right) + \rho' v_0 \cdot \nabla v_0 = -\nabla p' + f \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 u + \rho' v_0) = \rho_0 q \\ \frac{\partial s'}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla s' + u \cdot \nabla s_0 = 0 \\ c_0 \left(\frac{\partial \rho'}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \rho' + u \cdot \nabla \rho_0 \right) + (c^2) v_0 \cdot \nabla \rho_0 = \frac{\partial p'}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla p' + u \cdot \nabla p_0 \end{cases}$$

这是运动介质声学的基本方程。这个结果实际上与线化空气动力学的基本方程是完全一致的。该方程是非线性的, 在各种进一步的简化条件下, 已经被广泛应用于各种声学问题。

假定 $\rho_0 = \text{const}, v_0 = 0, p_0 = \text{const}, s_0 = \text{const}, \nabla f = 0$, 则方程可以进一步简化得到在均匀流或者在剪切流中传播的基本声学方程:

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial q}{\partial t}$$



这是古典声学的基本方程,也是静止流体介质中的声传播方程。

通常情况下,人们感兴趣的是在稳定的简谐激励下引起的稳定的声场,因为相当多的声源都是作简谐振动的,另外,根据傅里叶级数或者傅里叶变换,任意随时间的振动都可以看作是多个简谐振动的叠加或积分。下面利用变量分离方法求解基本声学方程,以此介绍时域形式与频域的转化方法。设

$$\begin{aligned} p' &= p(x, y, z) \cdot e^{j\omega t} \\ q &= q_0(x, y, z) \cdot e^{j\omega t} \end{aligned}$$

那么古典声学的基本方程的频域形式为

$$\nabla^2 p(x, y, z) - k^2 p(x, y, z) = -j\rho_0 \omega q_0(x, y, z)$$

式中, $k = \omega/c = 2\pi f/c$ 为波数, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率(Hz), 对应的波长是 $\lambda = 2\pi/k = 2\pi c/\omega = c/f$ 。

1.2.2 声学边界条件

前面主要讲述了声学方程的推导过程。如果要求解方程,还需要对方程的部分变量进行约束,形成封闭的方程组,才能确定方程的唯一解。这里的约束的变量就是声学边界条件。

避开声学求解的方法(有限元方法或者边界元方法),声学边界条件归结为以下三种:声质点速度边界条件、声压边界条件和混合边界条件(阻抗边界条件)。

1. 声质点速度边界条件

声质点速度边界条件的表现形式:

$$v_n = \bar{v}_n$$

在某些声学边界网格上给定声质点速度进行约束,比如用边界元方法求解一台柴油发动机的振动声辐射,那么可以将结构发动机表面结构振动速度映射到声学边界网格上,然后基于声学边界网格的声质点速度进行声场求解;在其他的声学问题中也可以给定声质点速度边界条件。

2. 声压边界条件

声压边界条件的表现形式:

$$p = \bar{p}$$

在某些声学边界网格上给定声压值进行约束,形成封闭的求解方程组。

3. 混合边界条件

混合边界条件又叫阻抗边界条件,其表现形式:

$$Ap + Bv_n = C$$

式中, A, B, C 表示已知值,通过某些声学边界网格上的声质点速度与声压关系来定义边界条件。混合边界条件,可以通过实验或者一些经验公式得知,其物理意义主要表现为声学边界网格的吸声效果或者反射系数。

在声学问题求解方法中,以上三种边界条件是最基础的声学边界条件,但是为了满足不同的数值(有限元、边界元)方法求解不同的声学问题,这三种边界条件又被推导出很多形式,这里不再详述。如果读者对于数值声学的具体理论和算法有兴趣,可以参考本书附带光盘 Introduction 目录下的 Numerical_Acoustics-LMS. pdf 文件。

1.3 声学数值计算方法简介

从总体来看,声学计算方法可以分为声学有限元方法、声学边界元方法、声线法以及统计能量法。

1.3.1 声学有限元方法

有限元在声学方程求解上已经发展了很多年,也得到了很多工程师的青睐,因为有限元方法可以求解复杂流场、温度场等变化梯度对声传播的影响,尤其在解决封闭空间的声场计算、在无限长管道的声场计算等方面都有相当的优势。但因为辐射场网格区域不能无限大,所以它半封闭空间远场辐射问题上遇到瓶颈。后来声学理论工程师们想出了一个办法,将无限空间的声学区域进行缩小,在声学辐射边界用声辐射边界条件,然后根据辐射边界上的声学信息,利用边界元方法求出远场的声辐射。这种方法的思路固然好,但是又遇到一个问题:如何定义声辐射边界条件。根据 LMS Virtual Lab 软件,大家可以看出声辐射边界条件的一个发展历程,即从最初的混合边界条件,到无限元声辐射边界条件,再到 PML(Perfect Matched Layer)完美匹配吸收边界条件,最终到 AML(Automatic Matched Layer)边界条件。其实,声辐射边界条件的发展过程也是声学有限元的发展过程,当今的 AML 边界条件可以说属于声学有限元的最高技术。当然在声学有限元的发展过程中,其声源的类型也得到了丰富,比如点声源、面声源、振动声源、偶极子声源、四级子声源、流体声源等等。在解决问题中,这种方法不仅可以求解纯声学问题,还可以解决声振耦合问题等。

下面简要介绍一下声学有限元的相关方程、无限元技术、PML 技术以及 AML 技术。

由于篇幅的限制,关于有限元的形函数及相关理论,可以参考有限元理论,这里只简单描述古典的声学方程如何转化为声学有限元形式。

在前面已经推导了古典的声学方程,这里需要将方程进行积分,如下式:

$$\int_V \tilde{p} (\nabla^2 p(x, y, z) - k^2 p(x, y, z) + j\rho_0 \omega q_0(x, y, z)) dV = 0$$

式中, \tilde{p} 为权函数, V 为计算域。

根据高斯理论,体积分和面积分之间的转换关系,可以将上式变换成以下关系:

$$\int_V (\nabla \tilde{p} \cdot \nabla p) dV - \omega^2 \int_V \left(\frac{1}{c^2} \tilde{p} \cdot p \right) dV = \int_V j\tilde{p}\rho_0 \omega q_0 dV - \int_S j\rho_0 \omega \tilde{p} v \cdot n dS$$

式中, S 表示 V 的边界。

将上式进行有限元网格离散,并整理得到数值形式的方程组

$$(\mathbf{K}_a + j\omega\mathbf{C}_a - \omega^2\mathbf{M}_a) \cdot \mathbf{p}_i = \mathbf{Q}_i + \mathbf{V}_{mi} + \mathbf{P}_i = \mathbf{F}_{ai}$$

式中, \mathbf{Q}_i 为输入的声源向量; \mathbf{V}_{mi} 为输入的声质点速度向量,即声质点速度边界条件; \mathbf{P}_i 为输入的声压向量,即声压边界条件; \mathbf{F}_{ai} 为声学激励; \mathbf{p}_i 为求解的网格节点声压; $\mathbf{K}_a + j\omega\mathbf{C}_a - \omega^2\mathbf{M}_a$ 为方程矩阵,稀疏矩阵。

在声学有限元求解中,如果给定声源及相关边界条件,那么通过稀疏矩阵求逆就可以算出声场,在 LMS Virtual Lab 里面采用 Krylov 迭代求解器使计算速度大大提高。针对声场辐射问题,采用了有限元方法,这里的关键技术是如何定义辐射边界条件,即给定 $\mathbf{P}_i, \mathbf{V}_{mi}$ 的辐射边



界,下面介绍无限元技术、PML 技术和 AML 技术。

1. 无限元技术

声学无限元技术,在 LMS Virtual Lab 中有所保留,但属于早期的一种声辐射边界条件,在 LMS Sysnoise 中是常用方法,现在基本上已经被淘汰,这里仅作一个简单介绍。

声学无限元技术是一种基于半解析的方法,将声学主控方程在球形或者椭球形坐标系下展开,通过级数叠加的形式来描述椭球面上的声学量,然后与有限元辐射边界匹配在一起,可以满足无反射边界条件。

在早期,无限元技术确实是一种新的突破,它打破了传统声学有限元方法求解外声场的弊端,但是它也存在很多的局限性,比如:① 声学有限元的边界必须画成椭球形状或者球形状,某种程度上增加了有限元的网格量;② 声学无限元方法的计算精度与级数叠加的个数有关,理论上级数叠加的个数越多,那么计算的精度越高,但是随之带来的数值求解收敛度变差,计算速度也会大大降低;③ 基于半解析半经验的方法,计算精度不能得到保证。

2. PML 技术

为了弥补声学无限元方法的很多不足,后续 LMS Virtual Lab 的声学研究团队又开发了 PML 声吸收边界条件(LMS Virtual Lab 9),在声学辐射边界增加了几层网格来吸收声学量,在增加的匹配层外周边界上设置声学量为零,就像海绵一样将辐射边界的声学量完全吸收。PML 的吸收层域的方程与声学有限元求解域的方程并不一样。通过适当地对主控方程增加吸收系数就可以转变为吸收层的控制方程,在 PML 域的内层边界与声学有限元辐射边界完全匹配,在 PML 域的最外层边界设置声学量为零,这样声学有限元方程组完全封闭,确定唯一解。

采用 PML 来处理有限元声辐射边界条件具有很多的优点:① 可以大大降低声学网格量,提高了计算速度;② 对有限元声学边界的形状没有要求,只需在原有的声学网格辐射边界多加几层网格域即可,拓宽了声学有限元解决问题的范畴;③ 在计算精度上,PML 边界条件得到了更多认证,并被广泛应用于多个领域,其中气动声学就采用 PML 作为声辐射边界条件。关于 PML 的理论,读者可以在众多的资料中查阅,本书不对 PML 理论作深入讲解。为了使读者更容易理解 PML 方法,在此将 PML 方法与无限元方法作一个简单比较。

如图 1.3 所示,无限元法要求模型到无限元基面至少要有一至两个声波波长,注意,这里提到的波长是指计算最低频率对应的最大波长 λ_{\max} ,而 PML 层厚度只需要大于 $\lambda_{\max}/15$ 即可,另外,PML 层可以做成任意形状的,并且对声学有限元层厚度没有特定要求,在满足声学有限元层的外层是凸多边形的情况下,只要有一层单元就可以了。因此相对于无限元来说,PML 层没有外形的约束,可以将 PML 层做得非常薄。需要注意,PML 层中的单元应该满足一个波长长度内至少有 6 个单元的要求。根据已有的经验来看,由于 PML 层相比无限元来说很薄,所以声学计算网格数降低很多,一般情况能比无限元网格自由度少 3~5 倍,计算量能减少几十倍甚至上百倍。除此之外,对于 PML 层可以有不透射声波的刚性壁存在,这在模拟声波在无限长管道中传播和声波在管道开口处传播的时候非常有用。在使用 PML 方法的时候还需要注意,PML 层的轮廓必须是凸形的,这是因为凸形可以充分考虑两个振动物体间声波的相互作用,而对于凹形网格,PML 则会吸收振动物体的声波,所以无法考虑整个振动物体声波的相互作用。