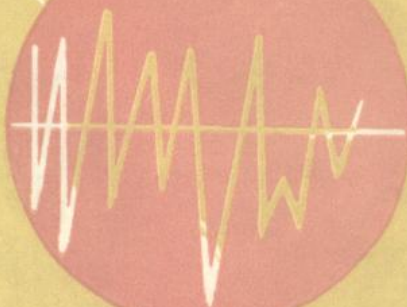


工程噪声 和振动分析基础

〔澳〕 M.P.诺顿 著



航空工业出版社

71.5°
210

DG51/E

工程噪声和振动分析基础

〔澳〕 M. P. 诺顿 著

盛元生 顾伟豪 韩建民 等译

盛元生 审校



航空工业出版社

1993

1015038

(京)新登字 161 号

内 容 简 介

噪声和振动对各类工程结构都有影响。了解噪声和振动及它们之间的交互作用对于机械、造船、航空、交通、环境等工程部门及环保和劳保系统有关人员是至关重要的。本书除论述了噪声和振动分析的基本理论、测量和控制方法、统计能量分析法的应用以及工程应用的实际问题等方面的内容外,与同类内容书籍相比,其创新独到之处是将噪声和振动分析结合在一起,进行了声传播和声辐射的研究,把噪声、振动理论与工程实践结合起来,特别适合于工程应用。本书特别强调了波-模态双重性概念及声波与固体结构之间的互相作用,关于不变功率源和不变体积源的分析阐明了刚性反射面对声源声功率的影响等等。书后附有联系实际的习题及其答案。

本书是高等工科院校师生和从事各种工程领域噪声和振动工作的广大工程技术人员的不可多得的教材和有价值的参考书。

**Fundamentals of noise
and vibration analysis for engineers**
M. P. Norton, Cambridge University Press, 1989

*

工程噪声和振动分析基础

[澳] M. P. 诺顿 著
盛元生 顾伟豪 韩建民 等译
盛元生 审校

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里14号)
—邮政编码: 100029—
全国各地新华书店经销
北京地质印刷厂印刷

1993年9月第1版	1993年9月第1次印刷
开本: 787×1092 1/16	印张: 27.875
印数: 1—1500	字数: 696 千字
ISBN 7-80046-550-0/G·008	
定价: 19.50 元	

60941301

前 言

目前,在世界各地的许多大学和理工学院里,噪声和振动以及这两者之间的交互作用的这一学科正在迅速地成为机械工程课程的一个必要的部分。现在已有许多关于机械振动的本科生教科书,还有相当数量的应用噪声控制的书籍。还有一些关于基础声学及其物理原理的教科书。关于机械振动的书必然只涉及振动理论部分,而不包括噪声与振动之间的关系。关于实用噪声控制的书主要是供专业人员使用,而不适合工科大学生。关于基础声学的书一般侧重讨论物理声学,基本不涉及工程噪声和振动,因此不太适合工程师的需要。还有一些关于结构振动、噪声辐射以及这两者之间交互作用的极好的专题教科书。可是,这些教科书对工程噪声和振动的覆盖面过窄,而且一般是针对研究生和专业人员的。还有一些关于冲击、振动和噪声控制的专业参考手册,这些书的读者对象是专业人员,而不是理工科大学生。

本书的主要目的是为工科大学生提供一种学习工程噪声和振动的分析与控制基本原理之统一方法。因而,本书的主要特点是把噪声和振动结合于一书之中,而不是对二者分别进行孤立的研究。此外,本书还特别强调声波与固体结构之间的交互作用,这是工程噪声和振动的一个重要方面。本书主要用于本科生的后阶段的工程课程。它也很适合于处在工程噪声和振动研究项目初期的研究生和专业人员,他们都希望得到关于本学科基本原理的综述和/或修订。

本书共分八章。每章的内容都在绪论中作了概述。由于内容范围广泛,每章都有自己的术语表和详细的参考文献目录。书后还提供了各章的精选习题及其答案。本书各章的内容是在作者给西澳大利亚大学机械工程系的本科生、西澳大利亚大学机械工程系的研究生、工程界的在职工程师专题讲座的资料的基础上形成的。全书大约分为72讲,每讲约45分钟。在绪论中提出了把全书划分成几个不同单元的建议。

作者希望本书对其读者能有一定的用处。书中肯定有些差错和/或印刷错误,读者一旦发现,恳请来信指正,作者将十分高兴和感谢。作者也愿意愉快地接受对本教科书提出的修改和/或补充建议。

最后,我要感谢所有那些在我的事业中和撰写本书的过程中给予过支持和帮助的人们,在此特别感谢阿得雷德大学(University of Adelaide)的M. K. Bull、D. A. Bies、R. E. Luxton、J. M. Pickles和J. R. Dyer; 联邦科学与工业研究机构(CSIRO)建设与工程处的D. C. Gibson; 声学振动研究所的F. J. Fahy,以及西澳大利亚大学的B. J. Stone。

还要感谢我在西澳大利亚大学的几位同事和研究生。感谢J. Soria、P. R. Keswick、W. K. Chiu和L. O. Kirkham。我还要由衷地感谢我的父母、妻子Christine和女儿Rebecca及Jessica,他们对我的全部事业和本书的问世给予了满腔热情的鼓励和支持。

M. P. 诺顿

绪 论

近二十年来,已经出现了大量的关于噪声和振动分析与控制的应用技术。在一本旨在为读者提供噪声和振动分析主要基础的教科书中试图包罗所有这些材料是不可能的。因此,本书只涉及工程噪声和振动分析与控制的系统方法所需要考虑的比较重要的基本问题,并且主要侧重于工业的场合。因而,本书具体涉及适用于机械工程师、结构工程师、采矿工程师、生产工程师、维修工程师等人员的工程噪声和振动分析的基本原理。全书包括八个独立章节,下面概述各章的内容。

第一章讨论机械振动,是部分基础理论的复习。本书的这一部分假设读者以前没有振动理论方面的知识。本章的大部分内容在现有教科书中都有叙述。本章的主要不同之处在于强调波-模态双重性,并促使读者以振动的波动和模态两种方法思考问题。因此,其导论既涉及集总参数模型,又涉及连续系统模型。单振子、随机激励强迫振动以及多振子的动力学部分用传统的“机械振动”方法介绍。连续系统部分的介绍使用传统的“机械振动”和波阻抗两种方法。波-模态双重性正是在本章中首次趋于明朗的。波阻抗方法对于识别结构零件中能量流的特性和估算在边界处的能量传播及反射特别有用。第一章的内容最适于作为二年级或三年级的机械振动课程单元(按总课程长度为四年考虑)。

第二章关于声波,是物理声学的一些基本原理的回顾。如同第一章一样,这章假设读者以前没有声学方面的知识。本章各节的内容包括齐次波动方程的经典分析,基本的声源模型,以及与气动噪声有关的非齐次波动方程,并对 Lighthill 的声模拟和 Powell-Howe 的涡旋声理论给予特别的注意。反复地强调了齐次与非齐次波动方程之间的区别。本章还包括关于反射面如何影响声源声功率特性的讨论,这个重要而有实际意义的特点经常被忽视。第二章的内容最适于作为三年级或四年级的基础声学课程单元。

第三章是第一、二两章的补充,讨论声波与固体结构之间的相互作用,抓住这一章对工程师们来说是非常重要的,这也是本书中最重要的基础章节。本章中经常使用波-模态双重性的概念。本章论述下列内容:流体-结构交互作用的基本原理、辐射比的概念、透过壁板的传声、流体的影响,以及冲击噪声过程。第三章的内容最适于作为三年级或四年级的课程单元,最佳的方法是把第二章和第三章合并为一个课程单元。

第四章是关于噪声和振动测量与控制方法的比较基本的章节。这一章的大部分内容在现有的噪声和振动控制手册文献中都有论述,但以下三点是本书首次阐明的:第一,恒定功率、恒定体积和恒定压力声源的概念是与刚性反射边界对这些声源的声功率特性的影响联系起来的讨论;第二,讨论了噪声控制和振动控制的经济问题;第三,介绍了用于声功率测量和噪声源识别的声强方法。第四章的内容最适于作为四年级的工程噪声控制和振动控制课程单元。当然,由于噪声和振动控制方法范围广泛,不得不从本章略去若干专题,其中包括消声器、室外声传播、社区噪声、空调噪声、传播线和滤波器、心理效应等。

第五章是关于噪声和振动信号分析。本章讨论的内容如下:确定性信号和随机信号、信号分析方法、模拟信号和数字信号的分析方法、随机误差和偏置误差、混叠、开窗,以

及测量干扰误差。第五章的内容最适于作为四年级的工程噪声和振动控制单元,而且最好与第四章和第八章结合起来,作为一个课程单元。

第六和第七章涉及一些更适于作为研究生课程的专题。第六章讨论统计能量分析方法在噪声和振动分析方面的应用。这包括能量流关系式、模态密度、内部损耗因子、耦合损耗因子、非守恒耦合、耦合结构声辐射的估算,以及动应力和动应变与结构振级之间的关系式。第七章讨论管道内的流动诱导噪声和振动。这包括柱形壳内的声场、柱形壳对管内流动的响应、重合,以及其他管流噪声源。这两章可以作为本科生课程最后一年的选修课程单元,或者作为以第四、第五和第八章为基础的课程单元的辅助阅读材料。

第八章基本上是关于噪声和振动作为诊断手段(即源识别和故障检测)的大量的定性叙述。这里叙述了幅域和时域信号分析方法、频域信号分析方法、倒频谱分析方法、声强分析方法,以及其他先进的信号分析方法。本章还包括五个具体的测试实例。第八章的内容最适于作为四年级的工程噪声和振动控制单元,而且最好与第四和第五章结合起来,作为一个课程单元。

根据上述说明,建议将本教科书作以下划分以便于组成课程单元。

- | | |
|-------------------------|--|
| (1) 二年级单元 | 机械振动(约14学时)
第一章(1.1~1.8节) |
| (2) 三年级单元 | 结构和流体中的波(约14学时)
第一章(1.9节),第二章(2.1、2.2节) |
| (3) 三或四年级单元 | 结构-声的交互作用(约18学时)
第二章(2.3、2.4节),第三章 |
| (4) 四年级单元* | 工程噪声控制(约18学时)
第四、五、八章 |
| (5) 选修专题单元和/
或辅助阅读材料 | 统计能量分析和管流噪声(约8学时)
第六、七章 |

* 第二章和第三章是工程噪声控制单元所必需的预备知识。

出版者说明

M. P. Norton教授在澳大利亚振动噪声工程界负有盛名，在国际声学界也是知名的。他曾于1986年、1987年先后到天津大学、沈阳航空工业学院以及西北工业大学就振动和噪声专题进行过讲学。

这本书于1989年出版时，正值审校者盛元生教授（国家级有突出贡献的专家）在澳大利亚进行学术访问，M. P. Norton教授当即赠给盛教授一本，并殷切希望他译成中文在中国出版。

M. P. Norton教授得知该书已完成翻译即将出版发行后，于1992年10月19日来信说：“我对你为了科学和技术交流而将我的书译为中文非常高兴。我确信这是非常有用和有意义的工作，对此我完全地支持。”又说：“非常感谢你翻译此书所作出的全部巨大的努力，且正如上面所述，你肯定能得到我的支持和鼓励，事实上，这本书要在中国出版，对我来说是极大的荣誉。”

本书的原名为《Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers》，根据全书的内容和应用，我们同译者把书名商定为《工程噪声和振动分析基础》。

参加本书翻译、出版工作的除盛元生、顾伟豪、韩建民外，还有王克明（译第四章及第八章）、郑玉全（译第七章和习题）、李德英、林智连、王同庆、薛长安、艾延廷、金业壮、宋瑞兰、邢兰芳等同志。本书的出版得到了航空工业总公司的周晓青、刘孝安、秦学新、周海燕、陈亚红、姚启杭和王守境等同志的大力支持和帮助，向他们致以诚挚的感谢。

目 录

前言	I
绪论	II
出版者说明	IV
第一章 机械振动：部分基础理论的复习	1
1.1 引言	1
1.2 导论性波动概念——弹性连续介质观点	2
1.3 关于多重、离散的质量-弹簧-阻尼器振子的导论性概念——宏观观点	5
1.4 关于自然频率、振动模态、受迫振动和共振的导论性概念	6
1.5 单振子（一种简便的模型）动力学	7
1.5.1 无阻尼自由振动	8
1.5.2 能量概念	9
1.5.3 具有粘性阻尼的自由振动	10
1.5.4 受迫振动：一些通论	14
1.5.5 具有谐激励的受迫振动	14
1.5.6 当量粘性阻尼概念——真实系统中的阻尼	19
1.5.7 具有周期激励的受迫振动	20
1.5.8 具有瞬态激励的受迫振动	21
1.6 具有随机激励的受迫振动	24
1.6.1 概率函数	25
1.6.2 相关函数	25
1.6.3 谱密度函数	27
1.6.4 线性系统的输入输出关系	30
1.6.5 单振子宽带激励的特殊情况	33
1.6.6 关于频响函数和传递函数的一个注释	35
1.7 能量和功率流关系式	35
1.8 多重振子——某些普遍方法的复习	38
1.8.1 简单的二自由度系统	38
1.8.2 简单的三自由度系统	39
1.8.3 多重振子的受迫振动	41
1.9 连续系统——弦、杆和板中波型的复习	43
1.9.1 振动的弦	43
1.9.2 棒和杆的准纵向振动	48
1.9.3 准纵向波的传播和反射	51
1.9.4 梁的横向弯曲振动	53

1.9.5 结构中波型的综述	56
1.9.6 模态相加方法	57
1.9.7 连续系统对随机荷载的响应	61
1.9.8 板中的弯曲波	64
参考文献	65
术语表	66
第二章 声波: 部分基础理论的复习	71
2.1 引言	71
2.2 齐次声学波动方程——经典的分析	74
2.2.1 质量守恒	75
2.2.2 动量守恒	76
2.2.3 状态热力学方程	78
2.2.4 线性化的声学波动方程	79
2.2.5 声学速度势	80
2.2.6 平面声波的传播	81
2.2.7 声强、能量密度和声功率	82
2.3 基本声源模型	83
2.3.1 单极子——简单球面声波	83
2.3.2 偶极子	86
2.3.3 靠近刚性的反射地面的单极子	88
2.3.4 装在刚性挡板上的振动活塞之声辐射	90
2.3.5 四极子——横向的和纵向的	93
2.3.6 柱形线声源	95
2.4 非齐次声学波动方程——气动声	95
2.4.1 非齐次波动方程对于简单源的解	96
2.4.2 Lighthill's 的声模拟	101
2.4.3 固体出现在流动中的效应	103
2.4.4 Powell-Howe 涡声理论	105
参考文献	107
术语表	109
第三章 声波和固体结构间的交互作用	113
3.1 引言	113
3.2 流体——结构交互作用的基本理论	113
3.3 无限板上的声辐射——波/边界匹配概念	116
3.4 导论性的辐射比概念	119
3.5 有限板型结构中弯曲波的声辐射	121
3.6 邻近不连续区域的声辐射——点力和线力激励	127
3.7 有限结构元件的声辐射	130
3.8 互易性原理的某些具体工程型的应用	134

3.9 通过壁板和间壁的声传播	136
3.9.1 通过单壁板的声传播	137
3.9.2 通过双页壁板的声传播	144
3.10 流体加载对振动结构的影响	146
3.11 撞击噪声	148
参考文献	149
术语表	151
第四章 噪声及振动的测量和控制方法	155
4.1 引言	155
4.2 噪声和振动测量单位 (级、分贝和谱)	156
4.2.1 客观的噪声测量标尺	156
4.2.2 主观的噪声测量标尺	157
4.2.3 振动测量标尺	158
4.2.4 分贝的加和减	159
4.2.5 频率分析带宽	161
4.3 噪声和振动测量仪器系统	163
4.3.1 噪声测量仪器	164
4.3.2 振动测量仪器	165
4.4 自由场声传播测量的关系式	168
4.5 声源的指向性	170
4.6 声功率模型-不变功率源和不变体积源	172
4.7 声功率的测量	173
4.7.1 自由场方法	174
4.7.2 混响场方法	174
4.7.3 半混响场方法	177
4.7.4 声强方法	178
4.8 关于工业噪声和振动控制的一些综合评论	181
4.8.1 工业噪声和振动的基本源	181
4.8.2 基本的工业噪声和振动控制方法	182
4.8.3 经济因素	186
4.9 室之间的声传播	187
4.10 声学封包	189
4.11 声学屏障	192
4.12 吸声材料	195
4.13 振动控制方法	200
4.13.1 低频隔振——单自由度系统	200
4.13.2 低频隔振——多自由度系统	202
4.13.3 音频范围的隔振	204
4.13.4 隔振材料	206

4.13.5 动力减振.....	207
4.13.6 阻尼材料.....	208
参考文献.....	209
术语表.....	211
第五章 噪声和振动信号分析.....	217
5.1 引言	217
5.2 确定性信号和随机信号	218
5.3 基本的信号分析方法	220
5.3.1 信号幅值分析	220
5.3.2 时域分析	223
5.3.3 频域分析	224
5.3.4 双信号分析	225
5.4 模拟信号分析	234
5.5 数字信号分析	235
5.6 与信号分析有关的统计误差	238
5.6.1 随机误差和偏置误差	238
5.6.2 混叠	240
5.6.3 开窗	241
5.7 与信号分析有关的测量噪声误差	243
参考文献.....	245
术语表.....	247
第六章 噪声与振动的统计能量分析.....	250
6.1 引言	250
6.2 统计能量分析的基本概念	251
6.3 能量流关系式	253
6.3.1 基本能量流概念	254
6.3.2 几点一般性说明	254
6.3.3 二子系统模型	255
6.3.4 现场估算方法	257
6.3.5 多重子系统	258
6.4 模态密度	259
6.4.1 结构元件的模态密度	260
6.4.2 声容积的模态密度	261
6.4.3 模态密度的测量方法	262
6.5 内部损耗因子	267
6.5.1 结构元件的损耗因子	268
6.5.2 声辐射损耗因子	268
6.5.3 内部损耗因子测量方法	270
6.6 耦合损耗因子	273

6.6.1 结构-结构的耦合损耗因子	274
6.6.2 结构-声容积的耦合损耗因子	275
6.6.3 声容积-声容积的耦合损耗因子	276
6.6.4 耦合损耗因子测量方法	276
6.7 耦合系统统计能量分析的应用实例	278
6.7.1 梁-板-室容积耦合系统	278
6.7.2 通过间壁耦合的两个室	280
6.8 非守恒耦合——耦合阻尼	282
6.9 用总损耗因子概念估算耦合结构的声辐射	283
6.10 动应力和应变与结构振级之间的关系	285
参考文献	286
术语表	290
第七章 管流噪声和振动: 一个研究实例	294
7.1 引言	294
7.2 流动扰动对管路噪声和振动影响的综述	295
7.3 圆柱壳内的声场	297
7.4 圆柱壳对内部流动的响应	300
7.4.1 振动响应和声辐射的普遍形式	300
7.4.2 圆柱壳的自然频率	302
7.4.3 内部壁压场	303
7.4.4 结合受纳函数	306
7.4.5 辐射比	307
7.5 重合——由高阶声模态引起的振动响应和声辐射	307
7.6 其它管流噪声源	312
7.7 振动响应和声辐射特性的预测	315
7.8 一些普遍性的设计准则	319
7.9 减少管流噪声和振动的振动阻尼器	320
参考文献	322
术语表	324
第八章 噪声与振动作为诊断手段	328
8.1 引言	328
8.2 关于用噪声和振动作为诊断手段的几点一般性说明	328
8.3 对现有信号分析方法的评述	331
8.3.1 常规的幅域和时域分析方法	332
8.3.2 常规的频域分析方法	337
8.3.3 倒频谱分析方法	339
8.3.4 声强分析方法	339
8.3.5 其它先进的信号分析方法	341
8.4 根据噪声和振动信号进行信号源识别和故障检测	345

8.4.1 齿轮	345
8.4.2 转子和轴	348
8.4.3 轴承	349
8.4.4 风机和鼓风机	352
8.4.5 炉子和燃烧器	353
8.4.6 冲床	355
8.4.7 泵	355
8.4.8 电气设备	356
8.4.9 复杂机器的源排队	358
8.4.10 结构零件	360
8.4.11 振动烈度准则	361
8.5 一些具体测试实例	364
8.5.1 装载车驾驶室的噪声源识别	364
8.5.2 大型感应电动机的噪声和振源识别	369
8.5.3 滚动轴承损伤的识别	371
8.5.4 煤气管道的流动诱导噪声和振动	375
8.5.5 铝壳赛艇的流动诱导噪声和振动	377
参考文献	378
术语表	380
习题	382
附录 1 有关工程噪声与振动控制的杂志	403
附录 2 一些常用建筑材料的典型传声损失值和声吸声系数	403
附录 3 单位和换算系数	405
附录 4 一些常用材料的物理性质	407
习题答案	409
英中文名词对照索引	421

第一章 机械振动: 部分基础理论的复习

1.1 引言

在动力学的研究中,常分别论述噪声和振动,而有时忘记了这两者的内在联系,即它们与在不同介质(通常分为流体和固体)中分子运动能量的传递有直接的关系。本书旨在将噪声和振动合在一卷内介绍,而不是孤立地论述各个主题。噪声与振动的中心是波-模态双重性的概念。为了方便起见,工程师们常把噪声考虑为波,而把振动考虑为模态。因此这种对于噪声、振动和两者间相互作用的基本理解,要求人们能够既考虑振动波也考虑振动模态。

本章根据波和模态两个概念来复习振动的机械系统的基础理论,因为机械振动动力学可以按任一概念进行研究。振动(噪声也如此)涉及物体的振荡特性。为使这种振荡运动存在,物体必须具有惯性及弹性。惯性使物体内的一个单元向相邻的单元传递动量,且与密度有关。弹性系指向已位移的单元施加使其回到平衡位置的力的性质。噪声与流体中的振荡运动有关,而振动与固体中的振荡运动有关。

振荡系统可作为线性的或非线性的来处理。对于线性系统,因果之间存在着直接关系,且叠加原理成立,即力的输入加倍,则输出响应加倍。对于非线性系统,因果之间不再成比例关系。在此,系统特性依赖于因变量,例如非线性结构的刚度依赖于其位移。

本书仅研究由线性微分方程描述的线性振荡系统。如果振荡的振幅相对于系统的物理尺度非常之小,线性的系统分析足以解释振荡系统的特性。在每一种情况下,当有外力存在,系统(具有惯性和弹性)从起始状态或连续地受激励,该外力能使系统回到其未被扰动的位置。高达 140 dB (在离起飞的喷气飞机~25m以外)的噪声级由线性的压强波动产生。因此大多数工程和工业型噪声源(它们一般小于140dB)及与其相关的机械振动均可假定具有线性特征。一些典型的例子为工业机器的噪声和振动特性,由管道中高速气流所产生的噪声和振动,以及机动车辆的噪声和振动。

线性系统的振动归纳为两类——自由的和受迫的。自由振动是当系统在没有任何外力作用下所产生的振动(即取消外作用力,系统在内力作用下振动)。一个有限系统经受自由振动时将其各种特有模式之一或几个模式振动,例如,研究张紧的弦在选定点受敲击的基本情况。每种特有的振动模式称之为振形,它以称之为自然频率的不变频率振动。这些自然频率是有限系统本身的特性并与其质量和刚度(惯性和弹性)有关。值得注意的是,如果系统为无限的,它将能以任何频率自由地振动(这一点与声波的传播有关)。另一方面,受迫振动在外力激励下发生。这些激励力可分类为:(I)谐和的;(II)周期的;(III)非周期的(脉冲或瞬态),或(IV)随机的。受迫振动在激励频率下产生,应注意,这些频率是任意的,因此与系统的自然频率无关。当系统的自然频率与某一激励频率重合则出现共振

象。自然频率、振动模态、受迫振动和共振的概念将在本章后面从弹性连续观点和宏观观点两个方面进行讨论。

在噪声和振动研究中阻尼概念也是非常重要的。系统内的能量被摩擦、热损失和别的阻力所耗散,因此任何受阻尼的自由振动将随时间消失。稳态受迫振动可维持一定的振动幅值,因为所需的能量由某种外部激励力提供。共振时仅由系统内的阻尼来限定振动幅值。固体和流体都具有阻尼,而实际系统(例如组合板和壳结构)对声场的响应既依赖于结构阻尼也依赖于声辐射阻尼。结构阻尼的概念将在本章介绍,并在第六章内和声辐射阻尼一道进一步详细讨论。

任何有限系统的动力学宏观(模态)分析要求理解自由度的概念。系统的自由度定义为全面地描述系统运动所需使用的独立坐标之最小数目。空间的独立质点应有三个自由度,有限刚体应具有六个自由度(三个位置分量和三个规定其方向的角度),连续弹性体将有无限数目的自由度(物体每点均有三个)。系统的自由度的数目和自然频率(或振动模态)具有一对一的关系,即一个具有 P 个自由度的系统将具有 P 个自然频率和 P 个振动模态。例如板、壳和声学容积在音频范围内具有成千上万个自由度(亦即有许多自然频率/振动模态)。就结构(轴类、机床等)的机械振动而论,结构的一些零件常可认为是刚性的,因此该系统可以简化为在动力学上相当于一个具有有限自由度的系统。这样,许多机械振动问题可简化为具有一个或两个自由度的系统。

振动系统时间响应的工程描述可由求解那些基于各种等价系统之数学模型的线性微分方程得到。当使用一个有限数目自由度的模型时,这个系统称之为集总的参数系统。此处,真实的系统近似地表示为一系列刚性质量、弹簧和阻尼器。当使用无限数目自由度模型时,系统称之为连续的或分布的参数系统。制约结构运动的微分方程始终和集总参数系统的相同,除非其质量、阻尼和刚度分布是连续的*,因此才可能得到方程的波型解。对于研究噪声和振动特别重要的波-模态双重性将在本章末尾较详细地讨论。

1.2 导论性波动概念——弹性连续介质观点

波动可描述为一种现象,它使质点受扰动,从而碰撞相邻的质点并将动量传给它们。碰撞后,质点围绕其平衡位置振荡,而不产生任何特定方向上的前进,即质点在介质中没有净移动,但扰动以一定速度通过介质传播,该速度是介质的、扰动运动学的、以及作用于介质的任何体积力外力的特性。波动可以用分子或微粒模型来描述。分子模型复杂且不方便,而微粒模型更适于作噪声和振动分析。微粒是一个足够大的体积元,它能包含上百万的分子,因此将其视为连续介质,且又足够的小以至它的热力学和声学变量是常数。固体能储存剪切能和压缩能,因此,可能有若干种波型,即压缩(纵向)波,挠曲(横向或弯曲)波,剪切波和扭转波。而流体则仅能储存压缩能。波动是势能和动能之间简单的平衡关系,不同的波型以不同的形式储存势能。压缩波将势能储存于纵向应变,而挠曲波储存于弯曲应变。

波动的一些基本例子有由于源(如采石场的爆破声)引起的声在大气中的传播;机械激励引起金属板(如机器盖)的弯曲运动和卵石投入流水而引起的涟漪。就与采石场爆破过程关连的声辐射来说,所产生的波既能逆风又能顺风传播。同理,流水中的涟漪也能逆

流和顺流传播。在这两例中扰动都是从源传播出去而没有反射。对于有限金属板，由于波在边界上的反射将产生一系列驻波。但这三个例子中的每一个在介质内都没有质点的净移动。

目前，必须着重指出，把实际生活中常见的比较普遍的时变波动模化为许多单频（谐波）波的叠加在数学上是很方便的。因此本书的论述将涉及这类模型。现将流体和固体中所遇到的主要波动类型的性质总结如下：

每种型式谐波运动均有两种不同的速度。它们是：（I）扰动通过介质的传播速度（该速度是介质的、扰动运动学的、以及作用于介质的任何体积力外力的特性）；（II）介质中质点的振荡速度（该微粒速度是产生振荡的扰动幅值的度量，并与测得的振动级或声压级有关）。对于任意自由表面上的压缩的和挠曲的波动来说，与谐波关联的这两类速度示于图1.1中。对于在压缩（纵向）波来说，有质点交替的膨胀区和压缩区，并且微粒速度和波速方向相同。声波在空气中的传播和纵向波在杆中的传播是这类波的典型。对于挠曲（横向或弯曲）波，微粒的速度垂直于波的传播方向。弦、梁、板和壳的弯曲运动是这类波动的典型。以后（在第三章）将阐明，弯曲波是唯一的一种能直接地促进噪声辐射和噪声通过结构（例如飞机机身）传播的结构波型。其主要理由是微粒速度（以及结构位移）垂直于波的传播方向，如图1.1(b)所示。这对相邻的流体微粒产生一种有效的扰动，引起结构和流体间有效的能量交换。在第三章中还将阐明，弯曲波速度随频率变化，而其它型式的波速（压缩的、扭转的等）则与频率无关。

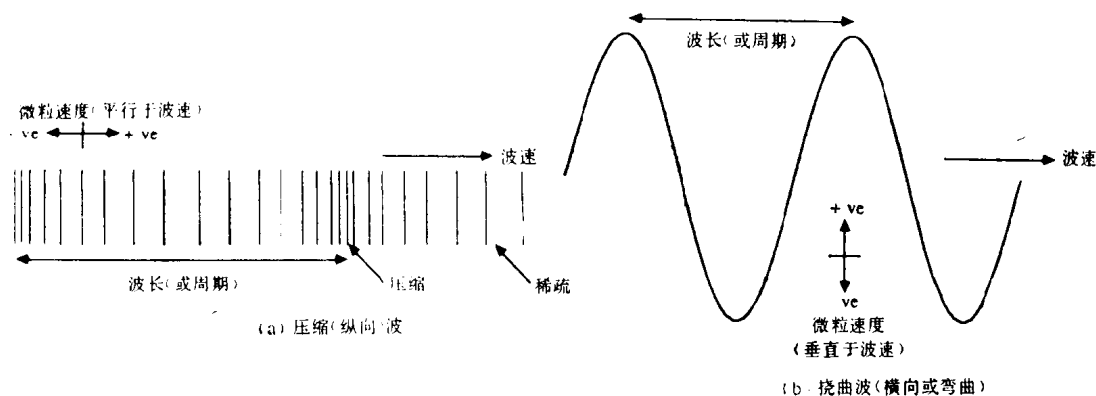


图 1.1 波和微粒速度的图解

任何波动均可表达为时间的、空间的或者是两者的函数。谐波运动中的时间变化可表达为角频（圆周的） ω 。这个参数表示单位时间增量的相位变化

$$\omega = 2\pi/T \quad (1.1)$$

式中 T 是波动的的时间周期。该关系示于图1.2中。波的相位（在时间的给定点上）是简单的相对于其起始位置的时间移位。在这个波动中的空间变化以单位距离增量的相位变化来表达。该参数称之为波数， k ，而

$$k = \omega/c \quad (1.2)$$

c 为波速(扰动通过介质的传播速度)。此波速有时也称为波的相位速度——它是单位时间增量的相位变化与单位距离增量的相位变化之比。谐波运动的空间周期以波长 λ 来描述,因此

$$k = 2\pi/\lambda \quad (1.3)$$

图1.3示出了此关系,并可看到角频率 ω 与波数 k 的类比关系。

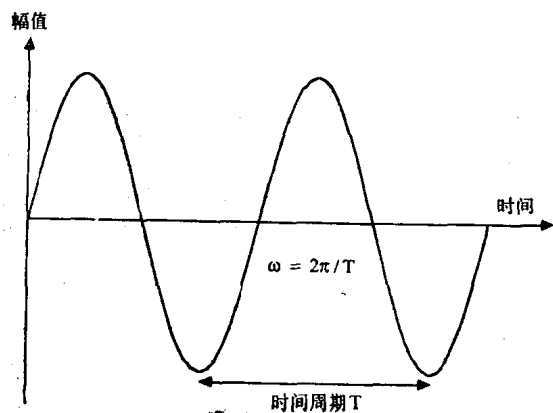


图 1.2 简单波动的时变化

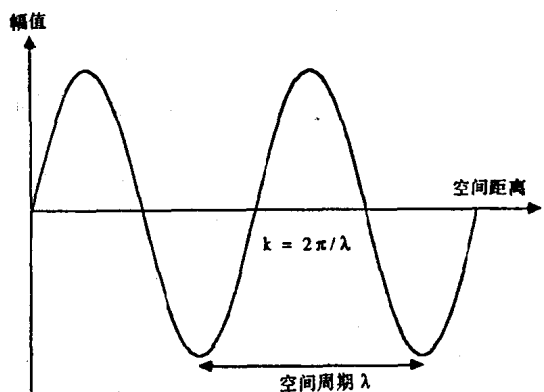


图 1.3 简单波动的空间变化

如果一个任意的时变波动(许多谐波之和)的波速 c 对于给定的介质是常数,那么 ω 和 k 之间的关系是线性的,因此为非消散的,即波的空间形式不随时间改变。另一方面,如果波速 c 不是常数(即随频率变化),则波的空间形式随时间变化,故是消散的。证明单频波为非消散的是个相当简单的练习,但是若干不同频率波只要它们各以不同的波速传播,其组合波就是消散的。消散关系式在讨论不同类型的波动交互作用(例如声波和结构

波之间的交互作用)时是很重要的。

当波是非消散的,波速 c 是常数,因此 $\partial\omega/\partial k$ (方程1.2的梯度)也是常数。当波是消散的,波速 c 和相应的消散关系式的梯度两者都是变量,如图1.4所示。消散关系式的梯度称之为群速,即

$$c_g = \partial\omega/\partial k \quad (1.4)$$

它量化了由消散波传输能量的速度。它是外加于载波束(一个能表示为多个谐波之和的时变波动)的一个幅值函数之行进速度,并具有重要的物理意义。平面声波和固体中的压缩波是

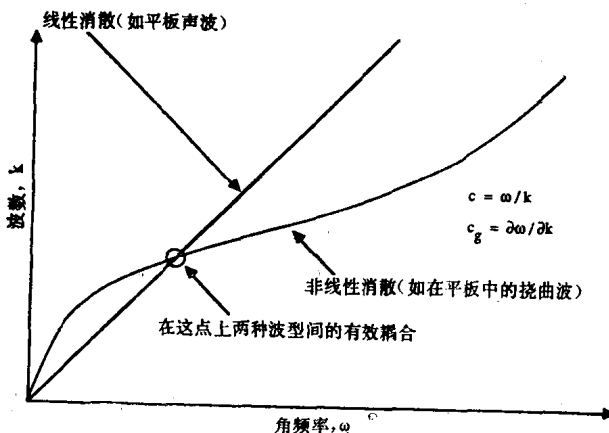


图 1.4 线性和非线性消散关系

非消散波的典型例子,固体中的挠曲波是消散波的典型例子。如果任何两种形式波动的消散关系曲线相交,则它们具有相同的频率、波数、波长和波速。这个条件(称为“重合”)为两种波型之间非常有效的交互作用创造了条件,在第三章和第七章中将比较详细地论述这个条件。