



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育“十三五”规划教材

# 噪声与振动控制技术基础 (第三版)

盛美萍 王敏庆 马建刚 编著



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育“十三五”规划教材

# 噪声与振动控制技术基础

(第三版)

盛美萍 王敏庆 马建刚 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为适应船舶类专业“振动与噪声控制技术”及其相关课程的教学和实践需要而编写。

本书分为基础篇、控制篇、运用篇三大部分。基础篇利用较少的篇幅,简明扼要地介绍了振动基础、声学基础、船舶结构动力学基础以及振动与噪声控制的一般过程。本书的重点在于介绍振动控制技术和噪声控制技术,在控制篇里,利用5章的篇幅,详细介绍了动力吸振、振动隔离、阻尼减振、吸声技术和隔声技术。在实际工程运用中,每一项专项控制技术并不是孤立的,在运用篇里,本书介绍了消声器,它是噪声控制各专项技术综合运用的典型例子。

本书可作为高等学校船舶类专业和机械类专业的教材,也可供相关专业的师生和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

噪声与振动控制技术基础/盛美萍,王敏庆,马建刚编著. —3版. —北京:科学出版社,2017

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-053958-8

I. ①噪… II. ①盛… ②王… ③马… III. ①噪声控制-高等学校-教材 ②振动控制-高等学校-教材 IV. ①TB53

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第168319号

责任编辑:赵晓霞 宁倩/责任校对:何艳萍

责任印制:赵博/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河骏立印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2001年8月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2007年12月第 二 版 印张:14

2017年8月第 三 版 字数:274 000

2017年8月第十次印刷

定价:39.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 第三版前言

十年弹指一挥间。在过去的十年中，我们承担了很多来自船舶、航天、航空、家电等工业部门的振动与噪声控制研究课题，也为这些工业部门输送了大量减振降噪的专门人才。现代工业对低振动、低噪声的需求，是工业文明高度发展的必然结果，也对减振降噪专业技术队伍提出了更高的要求。

目前，振动与噪声控制已成为船舶与海洋工程专业的一个重要方向。本次再版充分考虑到了这一变化，在动力吸振、阻尼减振、振动隔离等振动控制专项措施章节，以及吸声、隔声等噪声控制专项措施章节都增加了相关案例。这些案例主要来自作者的科研实践，以船舶与海洋工程专业方向为主。在修订各章节的同时，本书还增加了关于动力学分析方法的介绍，以期为有志于振动与噪声控制技术领域深造的读者提供必要的理论基础。

本书并不限于船舶与海洋工程专业使用，可以广泛用于工科类各专业。可以预见，在今后相当长的一段时间内，社会各行各业对减振降噪专门人才的需求还会进一步增加。我们真诚地希望，本书能够为减振降噪专门人才的培养做一点力所能及的贡献。

减振降噪是一项系统工程，最好的减振降噪方法不是事后的修补，而是在产品设计阶段就充分考虑减振降噪的需求。从这个意义上讲，欢迎更多的工程师来学习振动与噪声控制技术基础，这是提升产品性能更加有效的途径。

另外强调，实际的振动与噪声控制工程往往需要不止一项专项控制措施，读者在采取多项措施联合控制时，一定要有整体性的概念，以避免此起彼伏的情况。

我们在减振降噪科研与人才培养工作中已走过二十个年头。虽经历了一些风雨，但更多的是辛勤耕耘带来的充实和快乐，我们还将继续走下去。

作者

2017年6月

## 第二版前言

在过去几年中，我们已经看到，振动与噪声污染的危害日益受到人们的重视，社会对振动与噪声控制技术的需求也日益增长，相关图书大量面世的情况前所未有的，振动与噪声控制行业正处在蓬勃发展阶段。

本书第一版从 2001 年出版以来，得到了广大读者的支持和厚爱，第二版有幸入选“普遍高等教育‘十一五’国家级规则教材”，这是对我们的鞭策与鼓励，为此作者深表感谢！

在第二版中，我们对教材内容作了部分修正，并将全书分为基础篇、控制篇、运用篇三大部分。在基础篇里，将振动基础和声学基础加以浓缩，分别以一章的篇幅出现；在控制篇里，介绍了吸振、隔振、阻尼减振、吸声、隔声等专项控制技术；在运用篇里，主要介绍了消声器与声屏障，它们是噪声控制各专项技术综合运用的典型例子。为便于读者查阅，本书收录了一些常用标准作为附录，并在符号与公式相对比较集中第 1 章增加了相应的附录。

振动与噪声控制技术发展到今天，凝结了大量科研人员、工程技术人员的心血，为此我们向为这一技术发展作出贡献的专家学者表示由衷的感谢，向为本教材一版、二版提供无私帮助的人们表示衷心感谢。我们衷心希望本教材能够对广大学生和工程技术人员有益，同时也恳请各位读者对本教材提出宝贵意见。

在时间的长河中，六年只是一瞬间；而于作者而言，这是一段值得终生回味和铭记的时光。值此教材再版之际，请允许我表达一个心愿：愿人间少一点嘈杂与喧嚣，多一分和谐与美好。

盛美萍

2007 年 7 月

## 第一版前言

噪声污染是严重的环境污染之一，随着现代工业化程度的不断提高，噪声污染也日益加剧，严重影响广大人民群众的身心健康，因此噪声控制已经成为环境保护的一项重要内容。大气污染、水污染属于化学污染，它们对人体和环境的影响是长期的；噪声污染属于物理污染，它的显著特点是几乎没有后效性，只要噪声停止，噪声污染随即消失，因此采用消声、吸声和隔声措施，可以有效消除噪声污染。振动是产生噪声的主要原因，因此振动控制不仅可以保护仪器设备和人员不受振动危害，而且采用减振隔振措施也可以有效地控制噪声污染。

从事噪声污染控制的专业人员必须具备振动和声学的基础知识，而目前高校理工科专业课程设置中，机械或力学类专业一般都设置振动基础类课程，而声学工程类专业一般只设置专业声学(如水声学、建筑声学、超声学等)或声学基础课程。本教材为适应环境噪声控制人员的需要而编写，主要包括振动基础、声学基础、声和振动的相互作用、噪声和振动控制技术等基本内容，同时也为从事低噪声机械设计人员提供了声与振动的基础知识。

环境科学与工程学科是一个综合性学科，该学科不同专业的基础知识相差甚远。因此本教材的编写由浅入深、由简单到复杂，以适合于从事环境规划和环境管理的人员阅读。

本教材不仅提供了声与振动的基础知识，而且为从事噪声和振动控制的工程技术人员提供了噪声与振动控制技术和实际例子，同时还给出了有关材料的参数。因此本教材亦可作为噪声和振动控制手册使用。

编写本教材的目的就是要为环境科学与工程类理工科大学生提供这样一本教材，即通过对本教材的学习，广大大学生不但能够知其然，而且能够知其所以然；不但能够运用现有噪声与振动控制技术，而且具备发展新的噪声与振动控制技术的能力。

本教材分为基础篇和应用篇两大部分。在基础篇里，将振动基础和声学基础加以浓缩，分别以一章的篇幅出现；在应用篇里，介绍了各种振动和噪声控制技术，其中大量地引用了本书作者和其他作者的论著，详细引用情况已在参考文献中列出，在此作者向他们表示衷心感谢。

作者衷心希望本教材能够对广大学生和工程技术人员有益。但由于作者水平有限及时间仓促，教材中难免存在一些差错或遗漏，恳请各位读者批评指正。最

后，作者要特别感谢武延祥教授在本教材的编写过程中给予的支持和帮助。

作者

2001年4月

# 目 录

第三版前言	
第二版前言	
第一版前言	

## 基 础 篇

第 1 章 振动基础概述	3
§1.1 质点振动学	3
§1.1.1 单自由度系统的自由振动	4
§1.1.2 有阻尼的自由振动	6
§1.1.3 质点的强迫振动	8
§1.2 弹性体振动基础	13
§1.2.1 弦振动	14
§1.2.2 梁的纵振动	18
§1.2.3 梁的横振动	21
§1.2.4 薄板的横振动	27
振动基础部分常用符号与公式	33
习题	35
第 2 章 声学基础概述	37
§2.1 声波的基本性质	37
§2.1.1 理想流体介质中的声波方程	38
§2.1.2 平面波、球面波和柱面波	41
§2.1.3 声波的反射与透射	45
§2.2 典型声源及其声辐射	47
§2.2.1 脉动球源、点声源和多极子声源	48
§2.2.2 无限障板上活塞式辐射声场	53
§2.2.3 板的声辐射	56
习题	59
第 3 章 船舶结构动力学基础	61
§3.1 动态系统研究方法	61



§3.1.1	集中质量法	61
§3.1.2	假设模态法	63
§3.1.3	瑞利法	65
§3.1.4	里兹法	66
§3.1.5	有限元法	67
§3.1.6	统计能量分析法	68
§3.2	船舶结构中的弹性波	70
§3.2.1	概述	70
§3.2.2	梁中的弹性波	71
§3.2.3	板中的弹性波	73
§3.2.4	圆柱壳体中的弹性波	74
§3.3	结构中的波型转换	76
<b>第 4 章</b>	<b>振动与噪声控制的一般过程</b>	<b>78</b>
§4.1	倍频程分析	78
§4.1.1	基本概念	78
§4.1.2	与窄频带宽分析关系	80
§4.2	振动评价及控制的一般过程	81
§4.2.1	振动的评价	81
§4.2.2	振动控制的一般过程	84
§4.3	噪声评价及控制的一般过程	85
§4.3.1	噪声的评价	85
§4.3.2	噪声控制的一般过程	91
习题		92

### 控制篇

<b>第 5 章</b>	<b>动力吸振</b>	<b>95</b>
§5.1	动力吸振原理	95
§5.1.1	无阻尼动力吸振器	95
§5.1.2	无阻尼动力吸振器的使用条件	98
§5.1.3	阻尼动力吸振器	99
§5.1.4	复式动力吸振器	101
§5.1.5	非线性动力吸振器	103
§5.2	动力吸振器参数影响分析及设计	104
§5.2.1	动力吸振器参数影响分析	104

§5.2.2 动力吸振器设计步骤	107
§5.3 动力吸振典型案例	108
习题	109
<b>第 6 章 振动隔离</b>	<b>110</b>
§6.1 隔振原理	110
§6.1.1 隔振的分类	110
§6.1.2 隔振的评价	111
§6.1.3 隔振原理	112
§6.1.4 隔振性能分析	114
§6.2 隔振设计与隔振器	115
§6.2.1 隔振设计步骤	115
§6.2.2 常用隔振器及其应用	117
§6.3 隔振典型案例	121
习题	123
<b>第 7 章 阻尼减振</b>	<b>125</b>
§7.1 阻尼减振原理	125
§7.1.1 阻尼的定义与作用	125
§7.1.2 阻尼的产生机理	126
§7.2 阻尼材料与阻尼结构	130
§7.2.1 阻尼材料	130
§7.2.2 阻尼基本结构及其应用	134
§7.3 阻尼减振典型案例	137
<b>第 8 章 吸声技术</b>	<b>140</b>
§8.1 吸声评价方法	140
§8.1.1 吸声系数	140
§8.1.2 吸声量	141
§8.1.3 吸声预估与应用	141
§8.2 吸声材料	143
§8.2.1 多孔性吸声材料的吸声机理	143
§8.2.2 影响多孔性吸声材料吸声系数的因素	144
§8.2.3 常用的吸声材料的吸声特性	145
§8.3 吸声结构	146
§8.3.1 共振吸声原理	146

§8.3.2 常用吸声结构 .....	147
§8.4 吸声降噪典型案例 .....	152
习题 .....	153
<b>第9章 隔声技术</b> .....	<b>155</b>
§9.1 隔声原理 .....	155
§9.1.1 透声系数与隔声量 .....	155
§9.1.2 质量定律 .....	156
§9.1.3 吻合效应 .....	157
§9.1.4 单层匀质墙的隔声性能 .....	159
§9.1.5 双层墙的隔声性能 .....	160
§9.2 隔声装置 .....	163
§9.2.1 隔声间 .....	163
§9.2.2 隔声罩 .....	166
§9.3 隔声降噪典型案例 .....	167
习题 .....	170
<b>运 用 篇</b>	
<b>第10章 消声器</b> .....	<b>173</b>
§10.1 消声器分类及其声学性能评价 .....	173
§10.1.1 消声器分类 .....	173
§10.1.2 消声器声学性能评价 .....	174
§10.2 消声器降噪作用机理 .....	176
§10.2.1 阻性消声器 .....	176
§10.2.2 抗性消声器 .....	180
§10.2.3 阻抗复合式消声器 .....	196
§10.3 消声器的高频失效现象 .....	199
§10.3.1 高频失效原理 .....	199
§10.3.2 高频失效预防措施 .....	203
§10.4 消声器空气动力性能评价 .....	206
§10.4.1 气流对消声器声学性能的影响 .....	207
§10.4.2 气动力性能评价 .....	209
习题 .....	212
<b>参考文献</b> .....	<b>213</b>

---

# 基 础 篇

---



# 第 1 章 振动基础概述

声音的本质就是气体、液体、固体介质中的质点振动，声音的产生和传播都离不开介质的力学振动行为。一阵微风吹来，人们就会听到树叶运动而发出“沙沙”的响声。音乐家轻轻拨动琴弦，提琴就会发出美妙的曲调。医生将听筒的一端置于病人的心脏部位，就能从另一端听到心脏“嘭嘭”跳动的声音。这些都是振动产生和传播声音的例子。声有利的一面，也有有害的一面。人们把不和谐的、令人反感的声音称为噪声。要抑制噪声的发生和传播，就必须了解噪声产生的原因和传播的规律，也就必须具备振动基本知识。

现实生活中，振动现象是无处不在的。世界上所有的物质都处在运动中，运动的方式千姿百态，而振动就是物体运动的一种十分重要和特殊的形式。物体在振动过程中，某些物理量(如位移、速度、加速度、电流、压力等)时大时小，发生周期性变化，如钟摆的周期性摆动；汽轮机主轴和叶轮在周期旋转过程中由于微小的偏心而产生的振动；汽车在凹凸不平的路面上行驶所产生的振动；高层建筑在风力作用下发生摇摆振动等。

振动学的研究范围十分广泛，本章主要介绍与声学问题联系比较密切的一些力学振动基础知识。1.1 节主要介绍质点振动学，1.2 节介绍一些典型弹性体的振动。

## §1.1 质点振动学

所谓质点振动系统，就是假定：构成振动系统的物体，不论几何尺寸大小如何，都可看作是一个物理量集中的系统。质点振动系统又称为集中参数系统。质点振动系统的最基本构成是质量块和弹簧。在质点振动系统中，质量块的质量可认为是集中在一点上，整个弹簧的刚度是均匀的，就是说弹性也可认为是集中在一点上，由此构成的运动系统的运动状态是均匀的。

任何物体都具有一定的几何尺寸，但是在一定的假设条件下，可以用质点振动系统来描述。判断实际振动系统是否可以简化为质点振动系统模型，就要看物体的几何尺寸相比物体中传播的振动波的波长的相对值。如果物体的几何尺度大于振动波的波长，这就意味着在某一个瞬时，物体上各个位置的振动状态是不一样的，这种情况下振动系统不能用质点振动系统来描述。如果物体的几何尺寸与

振动波的波长相比小得多，那么振动物体上各个位置的振动状态就可以看成是近似均匀的，这种情况下振动系统就可以近似为质点振动系统。需要特别强调的是：判断实际物体的振动能否作为质点振动系统来近似，并不取决于它的绝对几何尺寸大小，而要看它的几何尺寸与振动波波长的相对关系。

在质点振动系统的假设下，实际振动物体的振动分析就变得较为简单，而研究获得的振动规律也比较清晰和直观。

### § 1.1.1 单自由度系统的自由振动

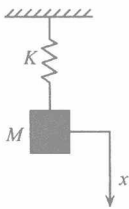


图 1.1 弹簧-质量块系统

一个振动系统的自由度是指在振动过程中任何瞬时都能完全确定系统在空间的几何位置所需要的独立坐标的数目。一个振动系统究竟有多少个自由度，不仅取决于系统本身的结构特性，还要根据所研究的振动问题的性质、要求的精度以及振动的实际情况等来确定。如图 1.1 所示的弹簧-质量块系统，质量块作为一个质点在空间有三个自由度，但是如果它只是在垂直方向作上下振动，则在振动过程中任何瞬时，系统的几何位置只需要一个独立坐标  $x$  就可以完全确定，这时可视其为单自由度振动系统。

最简单的单自由度振动系统就是一个弹簧连接一个质量块的系统。把质量块的质量记作  $M$ ，把弹簧的刚度记作  $K$ 。在没有外力扰动的情况下，质量块受到的重力与弹簧的弹力相平衡，系统处于相对静止状态。将静止状态下质量块的位置称为平衡位置。以平衡位置为坐标原点，假设有一个外力突然在  $x$  方向推动或拉动质量块，使得弹簧产生拉伸或压缩，随即释放，此后质量块在弹簧弹力的作用下，将在平衡位置附近作往复运动，也就是发生了振动。如果外力仅在初始时刻使物体产生一个初位置或初速度，而在振动过程中并无外力作用，那么这种情况下质点振动系统的振动就称为自由振动。

对图 1.1 所示的单自由度自由振动系统进行受力分析，如图 1.2 所示。当质量块离开平衡位置，沿  $x$  轴正方向产生位移  $\xi$  时，弹簧也相应伸长  $\xi$ ，这时质点上就受到了弹簧的作用力。这里假设质点离开平衡位置的位移很小，以致弹簧的伸长或收缩没有超出弹性变形的限度，按照胡克定律，在弹性范围内，弹簧力的大小与变形量成正比，称为线性恢复力，并可表示为

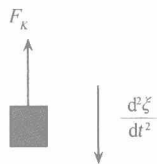


图 1.2 振子受力分析

$$F_k = -K\xi \tag{1.1.1}$$

式中, 比例系数  $K$  就是弹簧的刚度系数, 简称刚度, 它等于弹簧发生单位变形量所需要的力。有时也用其倒数来表示, 刚度系数的倒数称为顺性系数, 或简称力顺, 它等于单位力产生的变形量。线性恢复力的作用就是使离开平衡位置的质点趋于恢复到平衡位置, 因此线性恢复力的方向与质点位移的方向刚好相反。

按照牛顿第二运动定律, 质点在线性恢复力的作用下将产生加速度, 有

$$M \frac{d^2 \xi}{dt^2} = -K \xi \quad (1.1.2)$$

式(1.1.2)经过整理可以写成如下形式

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + \omega_0^2 \xi = 0 \quad (1.1.3)$$

式中,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$  是引入的一个参量, 称为振动圆频率。式(1.1.3)就是质点的自由振动方程。通过求解自由振动方程, 就可以获得自由振动的一般规律。式(1.1.3)是对时间  $t$  的齐次二阶常微分方程, 其解的一般形式应是两个简谐函数的线性叠加

$$\xi = C \cos(\omega_0 t) + D \sin(\omega_0 t) \quad (1.1.4)$$

式中,  $C$ 、 $D$  为两个待定常数, 由运动的初始条件确定。式(1.1.4)也可写成另一种形式

$$\xi = \xi_A \cos(\omega_0 t - \phi_0) \quad (1.1.5)$$

式中,  $\xi_A$  为位移振幅;  $\phi_0$  为振动起始时刻的初相位。

振动问题也可以通过复数解来表示, 采用复数解可以简化数学处理, 式(1.1.3)的复数解为

$$\xi = A e^{j\omega_0 t} \quad (1.1.6)$$

式中, 系数  $A$  由初始条件确定。当然采用复数解也有一些缺点, 因为复数解不能直接地描述物理问题的直观情况, 在必要时还需对求解结果取实部(或虚部)。

不管采用哪一种解的形式, 获得振动位移之后, 由振动位移可以方便地获得振动速度  $v = d\xi/dt$  和振动加速度  $a = d^2\xi/dt^2$ 。

运动自  $t=0$  时刻开始, 经过  $t=T$  时间又恢复到原来状态,  $T$  就是振动的周期。从式(1.1.5)可以得到,  $\omega_0 T = 2\pi$ , 即振动的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (1.1.7)$$



振动分析中人们通常采用频率的概念, 频率  $f$  与周期  $T$  互为倒数, 频率  $f = \frac{1}{T}$  表示每秒振动的次数, 频率的单位是赫兹, 记作 Hz。频率  $f$  与圆频率  $\omega$  满足如下关系

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.1.8)$$

对于上述的单自由度自由振动系统, 频率  $f$  反映了系统振动的固有特性, 因此称为固有频率, 固有频率一般以符号  $f_0$  表示。对于上述分析的自由振动系统, 可以写出其固有频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1.1.9)$$

由式(1.1.9)可见:

(1) 当质点作自由振动时, 其振动频率仅与系统的固有参量有关, 而与振动的初始条件无关。自由振动系统的这一特性, 在日常生活中比较常见。例如, 键盘类乐器标定后, 按动某一个琴键, 不管按动的轻重如何, 琴键所发出声音的频率是一定的, 按得轻或按得重仅影响声音的强弱。

(2) 对于质点振动系统, 质量越大, 则系统的固有频率越低; 刚度越大, 则系统的固有频率越高。这一规律在振动与噪声控制中具有重要意义: 通过改变系统的质量或刚度, 就可以改变系统的固有频率, 使之落于一定的频带范围之外, 从而保证在人们所关心的频带范围内具有较小的振动或噪声。

### § 1.1.2 有阻尼的自由振动

在前面所述的自由振动中并未考虑运动的阻力, 由于振动过程中机械能守恒, 系统保持持久的等幅振动。但实际系统振动时不可避免地存在阻力, 因而在一定时间内振动逐渐衰减直至停止。阻力有多种来源, 如两个物体之间的干摩擦阻力、气体或液体介质的阻力、有润滑剂的两个面之间的摩擦力、由于材料的黏弹性而产生的内部阻力等。在振动中这些阻力统称为阻尼。

阻尼的存在将消耗振动系统中的能量, 消耗的能量转变为热能和声能传播出去。有阻尼的自由振动也称为衰减振动。

不同的阻尼具有不同的性质。两个平滑接触面之间的摩擦力  $F$  与两个面之间的垂直压力  $N$  成正比, 即

$$F = \alpha N \quad (1.1.10)$$