

# 噪声与振动控制技术 及其应用

ZAOSHENG YU ZHENDONG KONGZHI JISHU  
JIQI YINGYONG

杨贵恒 杨雪 何俊强 苏红春 张伟 编著

非外借



化学工业出版社

# 噪声与振动控制技术 及其应用

ZAOSHENG YU ZHENDONG KONGZHI JISHU  
JIQI YINGYONG

杨贵恒 杨雪 何俊强 苏红春 张伟 编著



化学工业出版社

· 北京 ·



#### 图书在版编目 (CIP) 数据

噪声与振动控制技术及其应用/杨贵恒等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-122-31313-3

I. ①噪… II. ①杨… III. ①噪声控制②振动控制  
IV. ①TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 001595 号

---

责任编辑: 高墨荣

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 边 涛

装帧设计: 王晓宇

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市延风印装有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 23¼ 字数 594 千字 2018 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

FOREWORD

随着现代工业的飞速发展,噪声与振动如同水污染、大气污染、废弃物污染一样,已成为一种社会公害,影响着人们的正常工作、学习和生活。噪声与振动控制已成为劳动保护和环境科学中一门重要学科,越来越受到人们的重视。

隔声罩、隔声屏、隔声间、消声器、减振器等都是噪声与振动控制的高效工程应用设备,它们的设计受多种因素的制约。如何更好地利用材料的吸声、隔声、消声、隔振特性,阻碍噪声与振动的传播,或让噪声与振动的能量耗散掉,从而达到高效降噪与减振的目的是撰写本书的主要目的。

本书共分9章。第1章简明叙述了噪声与振动控制的基础知识。第2~4章分别讲述了噪声评价及其标准、噪声测量分析技术以及噪声源及其控制方法概论,并力求通俗易懂、简洁,着重讲清基本概念、基本理论和基本方法。第5~7章详细地阐明噪声控制技术,分别介绍了吸声、隔声、消声技术及其应用。第8章介绍了振动的危害、振动的评价标准、振动的测量、振动控制基本方法以及隔振与阻尼减振技术及其应用。在编写这些内容时,力求由浅入深、循序渐进、理论联系实际,并引入许多设计例题和应用实例。第9章以静音型柴油电站设计为例,详细讲述噪声与振动控制的工程应用。通过工程应用实例,可提高读者分析问题、解决问题的能力,从而可将噪声与振动控制技术更好地应用于工程实践。

本书由杨贵恒、杨雪、何俊强、苏红春、张伟编著,杨贵恒统稿。袁春、强生泽、向成宣、龚利红、金丽萍、赵英、刘小丽、杨翱、刘扬、任开春、蒲红梅、张海呈、杨波、张传富、杨科目、雷绍英、邹洪元、陈昌碧、杨贵文、徐树清、杨芳、温中珍、温中云、蒋王莉、余江、杨胜、杨蕾、杨楚渝、王涛、吴伟丽等做了大量的资料搜集与文字整理工作,在此表示衷心感谢!

本书内容由浅入深、通俗易懂、实用性强,可作为高等院校机械工程、环境科学与工程及其他相关专业的教学用书,也可作为噪声与振动控制方面的培训教材,还可供从事噪声与振动控制方面的工程技术人员学习参考。

随着噪声与振动控制技术的快速发展,其新理论与新技术不断涌现,限于水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编著者

# 目 录

## CONTENTS

### 第 1 章 噪声与振动控制基础

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1.1 机械振动简介 .....       | 1  |
| 1.1.1 自由振动 .....       | 1  |
| 1.1.2 阻尼振动 .....       | 2  |
| 1.1.3 强迫振动 .....       | 3  |
| 1.2 噪声及其分类 .....       | 4  |
| 1.2.1 声音的产生 .....      | 4  |
| 1.2.2 噪声的基本概念 .....    | 6  |
| 1.2.3 噪声的分类 .....      | 7  |
| 1.3 噪声的物理量度 .....      | 9  |
| 1.3.1 声压与声压级 .....     | 9  |
| 1.3.2 声强与声强级 .....     | 10 |
| 1.3.3 声功率与声功率级 .....   | 11 |
| 1.3.4 声级的计算 .....      | 13 |
| 1.3.5 噪声频谱与频带 .....    | 18 |
| 1.4 声音的传播特性 .....      | 21 |
| 1.4.1 声场的基本概念 .....    | 21 |
| 1.4.2 声源声辐射的指向特性 ..... | 22 |
| 1.4.3 声波的传播 .....      | 22 |
| 1.4.4 声波的自然衰减 .....    | 24 |
| 习题与思考题 .....           | 28 |

### 第 2 章 噪声评价及其标准

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2.1 噪声的危害 .....         | 29 |
| 2.1.1 对听力系统的影响 .....    | 29 |
| 2.1.2 对睡眠和休息的干扰 .....   | 31 |
| 2.1.3 影响语言交流 .....      | 31 |
| 2.1.4 对人的生理和心理的影响 ..... | 32 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2.2 噪声的评价 .....         | 33 |
| 2.2.1 人的听觉 .....        | 33 |
| 2.2.2 响度级和等响曲线 .....    | 36 |
| 2.2.3 频率计权 .....        | 43 |
| 2.2.4 噪声基本评价量 .....     | 45 |
| 2.3 噪声评价标准 .....        | 50 |
| 2.3.1 环境噪声允许标准 .....    | 51 |
| 2.3.2 听力和健康保护标准 .....   | 55 |
| 2.3.3 声源噪声控制标准 .....    | 55 |
| 2.4 声环境影响评价 .....       | 64 |
| 2.4.1 评价工作程序 .....      | 64 |
| 2.4.2 评价工作等级 .....      | 65 |
| 2.4.3 评价基本要求 .....      | 65 |
| 2.4.4 声环境现状调查及其评价 ..... | 67 |
| 2.4.5 声环境影响预测 .....     | 68 |
| 2.4.6 评价的主要内容 .....     | 68 |
| 2.4.7 噪声防治对策 .....      | 69 |
| 习题与思考题 .....            | 70 |

第 3 章 噪声测量分析技术

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 3.1 常用噪声测量仪器 .....    | 71  |
| 3.1.1 声级计 .....       | 71  |
| 3.1.2 噪声剂量仪 .....     | 80  |
| 3.1.3 声强测量仪 .....     | 81  |
| 3.2 噪声测量方法 .....      | 86  |
| 3.2.1 噪声测量方法概述 .....  | 86  |
| 3.2.2 环境噪声测量 .....    | 87  |
| 3.2.3 工业企业噪声测量 .....  | 95  |
| 3.3 噪声信号分析 .....      | 98  |
| 3.3.1 相关性概念 .....     | 98  |
| 3.3.2 自相关和互相关函数 ..... | 99  |
| 3.3.3 功率谱密度函数 .....   | 101 |
| 3.3.4 相干函数 .....      | 103 |
| 3.3.5 频谱与倒频谱分析法 ..... | 103 |
| 习题与思考题 .....          | 107 |

第 4 章 噪声源及其控制方法概论

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 4.1 机械噪声及其控制 ..... | 108 |
| 4.1.1 撞击噪声 .....   | 108 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 4.1.2 | 周期性作用力激发的噪声 ..... | 109 |
| 4.1.3 | 摩擦噪声 .....        | 109 |
| 4.1.4 | 结构振动辐射的结构噪声 ..... | 110 |
| 4.2   | 空气动力性噪声及其控制 ..... | 110 |
| 4.2.1 | 喷射噪声 .....        | 112 |
| 4.2.2 | 涡流噪声 .....        | 113 |
| 4.2.3 | 旋转噪声 .....        | 114 |
| 4.2.4 | 周期性进排气噪声 .....    | 115 |
| 4.2.5 | 燃烧噪声 .....        | 116 |
| 4.2.6 | 激波噪声 .....        | 118 |
| 4.3   | 电磁噪声及其控制 .....    | 119 |
| 4.3.1 | 直流电机的电磁噪声 .....   | 119 |
| 4.3.2 | 交流电机的电磁噪声 .....   | 121 |
| 4.3.3 | 变压器的电磁噪声 .....    | 122 |
| 4.4   | 噪声控制的基本途径 .....   | 122 |
| 4.4.1 | 声源控制 .....        | 123 |
| 4.4.2 | 传播途径控制 .....      | 124 |
| 4.4.3 | 接受者保护控制 .....     | 125 |
| 4.5   | 噪声控制的工作程序 .....   | 128 |
| 4.5.1 | 调查噪声现场 .....      | 128 |
| 4.5.2 | 确定降噪量 .....       | 128 |
| 4.5.3 | 选定噪声控制方案 .....    | 128 |
| 4.5.4 | 降噪效果的鉴定与评价 .....  | 129 |
|       | 习题与思考题 .....      | 129 |

## 第5章 吸声技术及其应用

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 5.1   | 吸声技术基础 .....        | 130 |
| 5.1.1 | 吸声原理与吸声系数 .....     | 130 |
| 5.1.2 | 吸声系数的测定方法 .....     | 131 |
| 5.1.3 | 影响材料吸声性能的主要因素 ..... | 133 |
| 5.2   | 吸声材料 .....          | 138 |
| 5.2.1 | 无机纤维材料类 .....       | 138 |
| 5.2.2 | 泡沫塑料类 .....         | 143 |
| 5.2.3 | 有机纤维材料类 .....       | 144 |
| 5.2.4 | 吸声建筑材料类 .....       | 146 |
| 5.3   | 吸声结构 .....          | 147 |
| 5.3.1 | 多孔材料吸声结构 .....      | 147 |
| 5.3.2 | 共振吸声结构 .....        | 150 |
| 5.3.3 | 微穿孔板吸声结构 .....      | 155 |
| 5.4   | 吸声降噪设计及其应用实例 .....  | 159 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 5.4.1 室内声场及其相关参数 .....  | 159 |
| 5.4.2 吸声降噪量的计算 .....    | 165 |
| 5.4.3 吸声降噪设计的一般原则 ..... | 166 |
| 5.4.4 吸声降噪设计的一般步骤 ..... | 166 |
| 5.4.5 吸声降噪实例 .....      | 167 |
| 习题与思考题 .....            | 169 |

## 第6章 隔声技术及其应用

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 6.1 隔声技术基础 .....        | 170 |
| 6.1.1 隔声性能的评价 .....     | 170 |
| 6.1.2 单层结构的隔声 .....     | 172 |
| 6.1.3 双层结构的隔声 .....     | 180 |
| 6.2 隔声间的设计与应用 .....     | 186 |
| 6.2.1 组合墙体的隔声量 .....    | 186 |
| 6.2.2 孔洞和缝隙对隔声的影响 ..... | 186 |
| 6.2.3 隔声门的设计 .....      | 188 |
| 6.2.4 隔声窗的设计 .....      | 191 |
| 6.2.5 隔声间实际隔声量的计算 ..... | 198 |
| 6.2.6 隔声间设计应用实例 .....   | 198 |
| 6.3 隔声罩的设计与应用 .....     | 199 |
| 6.3.1 隔声罩的选材与结构形式 ..... | 199 |
| 6.3.2 隔声罩实际隔声量的计算 ..... | 199 |
| 6.3.3 隔声罩设计要点 .....     | 200 |
| 6.3.4 隔声罩隔声效果的测试 .....  | 201 |
| 6.3.5 隔声罩设计应用实例 .....   | 202 |
| 6.4 隔声屏的设计与应用 .....     | 203 |
| 6.4.1 隔声屏的降噪原理 .....    | 203 |
| 6.4.2 自由声场中隔声屏的性能 ..... | 204 |
| 6.4.3 室内隔声屏性能分析 .....   | 204 |
| 6.4.4 隔声屏设计注意事项 .....   | 207 |
| 6.4.5 隔声屏应用实例 .....     | 207 |
| 习题与思考题 .....            | 208 |

## 第7章 消声技术及其应用

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 7.1 消声器简介 .....      | 210 |
| 7.1.1 消声器的常见种类 ..... | 210 |
| 7.1.2 消声器性能的评价 ..... | 211 |
| 7.1.3 消声器性能的测量 ..... | 217 |
| 7.2 阻性消声器 .....      | 218 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 7.2.1 | 多通道的阻性消声器 .....   | 219 |
| 7.2.2 | 气流对消声性能的影响 .....  | 224 |
| 7.2.3 | 阻性消声器的设计要点 .....  | 226 |
| 7.2.4 | 阻性消声器设计实例 .....   | 228 |
| 7.2.5 | 阻性消声器元件性能实验 ..... | 230 |
| 7.3   | 抗性消声器 .....       | 235 |
| 7.3.1 | 扩张室消声器 .....      | 235 |
| 7.3.2 | 共振腔消声器 .....      | 243 |
| 7.4   | 其他类型消声器 .....     | 250 |
| 7.4.1 | 阻抗复合式消声器 .....    | 250 |
| 7.4.2 | 微穿孔板消声器 .....     | 252 |
| 7.4.3 | 干涉式消声器 .....      | 255 |
| 7.4.4 | 排气放空消声器 .....     | 256 |
|       | 习题与思考题 .....      | 260 |

## 第8章 振动控制技术及其应用

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 8.1   | 振动的危害 .....      | 262 |
| 8.1.1 | 影响人体健康 .....     | 262 |
| 8.1.2 | 干扰日常生活 .....     | 264 |
| 8.1.3 | 影响工作效率 .....     | 264 |
| 8.1.4 | 损坏建构筑物 .....     | 266 |
| 8.1.5 | 影响精密设备 .....     | 267 |
| 8.1.6 | 振动产生噪声 .....     | 267 |
| 8.2   | 振动评价标准 .....     | 268 |
| 8.2.1 | 建筑物振动标准 .....    | 269 |
| 8.2.2 | 城市区域环境振动标准 ..... | 271 |
| 8.2.3 | 精密仪器设备振动标准 ..... | 272 |
| 8.3   | 振动的测量 .....      | 273 |
| 8.3.1 | 振动测试仪 .....      | 273 |
| 8.3.2 | 振动传感器 .....      | 276 |
| 8.3.3 | 振动测试仪的校准 .....   | 279 |
| 8.3.4 | 振动测量方法简介 .....   | 280 |
| 8.4   | 振动控制的基本方法 .....  | 282 |
| 8.4.1 | 振源控制 .....       | 282 |
| 8.4.2 | 振动传递过程中的控制 ..... | 283 |
| 8.4.3 | 设备隔振措施 .....     | 284 |
| 8.5   | 隔振技术及其应用 .....   | 284 |
| 8.5.1 | 隔振原理 .....       | 284 |
| 8.5.2 | 隔振器件 .....       | 289 |
| 8.5.3 | 隔振设计 .....       | 301 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 8.5.4 隔振技术应用实例 .....  | 304 |
| 8.6 阻尼减振技术及其应用 .....  | 304 |
| 8.6.1 阻尼减振降噪原理 .....  | 305 |
| 8.6.2 阻尼减振材料 .....    | 305 |
| 8.6.3 阻尼减振材料的应用 ..... | 308 |
| 习题与思考题 .....          | 310 |

## 第9章 噪声控制实例——静音型柴油电站设计

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 9.1 柴油电站噪声控制标准 .....      | 312 |
| 9.1.1 柴油机的噪声限值 .....      | 312 |
| 9.1.2 发电机的噪声限值 .....      | 313 |
| 9.1.3 发电机组的噪声限值 .....     | 315 |
| 9.2 柴油电站噪声的测量 .....       | 316 |
| 9.2.1 柴油机噪声的测量 .....      | 316 |
| 9.2.2 发电机噪声的测量 .....      | 320 |
| 9.2.3 发电机组噪声的测量 .....     | 324 |
| 9.3 50kW 电源车噪声控制 .....    | 324 |
| 9.3.1 噪声控制方案与通风散热设计 ..... | 324 |
| 9.3.2 车厢结构方案及散热特性分析 ..... | 336 |
| 9.3.3 整车试验与分析 .....       | 342 |
| 9.4 12kW 柴油发电机组噪声控制 ..... | 344 |
| 9.4.1 机组噪声源分析及控制 .....    | 345 |
| 9.4.2 机组隔声罩设计 .....       | 346 |
| 9.4.3 机组隔声罩试验与分析 .....    | 360 |
| 习题与思考题 .....              | 361 |

## 参考文献

# 第 1 章

## 噪声与振动控制基础

人类处在声音的包围之中，我们从日常生活中可以体会到声音总是有三个表征量，即音量的大小、音调的高低与音色的不同。这些都是与声音的物理特性密切相关的。这些声音中有些是人们需要的、想听的，如语言上的相互交谈或是音乐欣赏；而有些声音则是工作和生活中不想听的，这些声音就称之为“噪声”，其中也包括有人想听而干扰其他人休息的音乐声。心理学的观点认为噪声和乐声是很难区分的，它们会随着人们主观判别的差异而改变，因此噪声与好听的声音是没有绝对界限的。在《中华人民共和国环境噪声污染防治法》中，环境噪声是指在工业生产、建筑施工、交通运输和社会生活中所产生的干扰周围生活环境的声音。环境噪声污染，是指所产生的环境噪声超过国家规定的环境噪声排放标准，并干扰他人正常生活、工作和学习的现象。

噪声污染是当代的世界性问题。我国古代就有噪声污染问题，《说文解字》中就有对噪的解释：扰也；《玉篇》：群乎烦扰也。这是两千年以前的记载，当时仅指因人声喧哗而成为烦扰人的噪声；而近代的噪声污染则是大规模工业化的后果，随着各种机械设备、交通工具的急剧增加，噪声污染问题也越来越严重，它已经成为当今社会的四大公害（空气污染、水污染、废弃物污染和噪声污染）之一。振动与噪声控制技术就是减少噪声与振动对人们生活的危害，控制噪声与振动对人们的影响。

### 1.1 机械振动简介

机械振动，是物体沿直线或曲线并经过平衡位置的往复的周期性运动。在自然界，机械振动是广泛存在的。

#### 1.1.1 自由振动

最简单的机械振动是自由振动。自由振动（也称简谐振动）是物体经过平衡位置所做的往复的周期性运动。它是一种假定仅在振动初始时刻有外力作用的振动。如图 1-1 所示为一个自由振动系统，这个系统由一个重球和一个弹簧构成。



图 1-1 自由振动系统

在这里还要假定：重球可视为具有一定质量的质点，弹簧的弹性是均匀的并假定没有质量，该振动系统视为质点振动系统。

在上述假定下，由胡克定律可知：在弹性限度内，弹力与弹簧的伸长和压缩成正比。因此，当振动物体离开平衡位置，随着位移的增加，则弹簧的弹力也随之成正比地增加，弹力的大小与位移的大小成正比，弹力的方向与位移的方向相反。假设物体离开平衡位置的位移为  $x$ ，它在此位置上所受的弹力  $F$  可表示为

$$F = -kx \tag{1-1}$$

式中，负号表示力与位移的方向相反； $k$  是弹簧的弹性系数，亦称倔强系数或劲度系数。它在数值上等于弹簧伸长或压缩单位长度时所产生的弹力。 $k$  值越大，表示弹簧越“硬”，越不容易变形。有时用其倒数  $C_M$  来表示， $C_M = 1/k$ ，称为顺性系数，或称力顺。

如果振动物体的质量为  $m$ ，加速度  $a$  为  $d^2x/dt^2$ ，根据牛顿第二定律  $F = ma$ ，将  $F = m d^2x/dt^2$  代入式(1-1) 可得

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx \tag{1-2}$$

重球振动是自由振动的典型例子，从式(1-1)、式(1-2) 可知，自由振动是指物体在与位移的大小成正比并且总是指向平衡位置的力的作用下的振动。在自由振动中，加速度的大小与位移的大小成正比，加速度的方向与位移的方向相反。值得注意的是，自由振动是假设外力仅在开始时起作用，只有在这种假设条件下，物体所做的振动才是自由振动。用图形表示物体位移随时间变化的曲线，称为振动曲线，如图 1-2 所示。

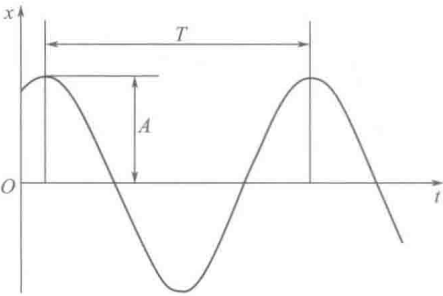


图 1-2 振动曲线

在图 1-2 所示的振动曲线中： $A$  为振幅，它是振动物体离开平衡位置的最大位移； $T$  为周期，即物体完成一次全振动（往返一次）所需的时间； $f$  为频率，即物体在单位时间内完成全振动的次数，单位是赫兹（Hz），周期和频率的关系是

$$T = 1/f \tag{1-3}$$

### 1.1.2 阻尼振动

自由振动只是一种理想情况，也称为无阻尼振动或固有振动。实际上，由于摩擦和其他阻力无法避免，振动物体最初获得的能量，在振动过程中会不断消耗，振幅也越来越小，最后振动就会停止。这种由于克服摩擦或其他阻力而逐渐减少能量和振幅的现象称为振动的阻尼。这种能量或振幅随时间减少的振动称为阻尼振动，也称为减幅振动。如图 1-3 所示为阻尼振动的典型振动曲线。

通常能量减少的方式有两种。一种是由于摩擦阻力的存在，或者是振动物体与周围媒质之间的黏滞摩擦，或者是物体自己的内摩擦，使振动的能量逐渐转变为热能。摩擦阻力越大，能量减少得越快，振动停止得越快，这种阻尼称为摩擦阻尼。另一种是由于物体的振动引起邻近质点的振动，使振动的能量逐渐向周围辐射出去，变为波动的能量，它使振动能逐渐转化为声能。这种阻尼称为辐射阻尼。

严格地说，没有阻尼的自由振动才是周期性的振动，存在阻尼时便不是周期性振动，因为在经过一个周期后，振动物体并不会回到原来的状态。但是，如果阻尼不大，可以把阻尼振动近似看作是简谐的自由振动。它也有一定的周期，不过这个周期应理解为在同一方向连续通过平衡位置两次的时间间隔。这个周期由振动物体本身的性质和阻尼的大小两个因素共同决定。对于一定的振动物体或系统，有阻尼的周期要比无阻尼的周期长，即完成一次振动

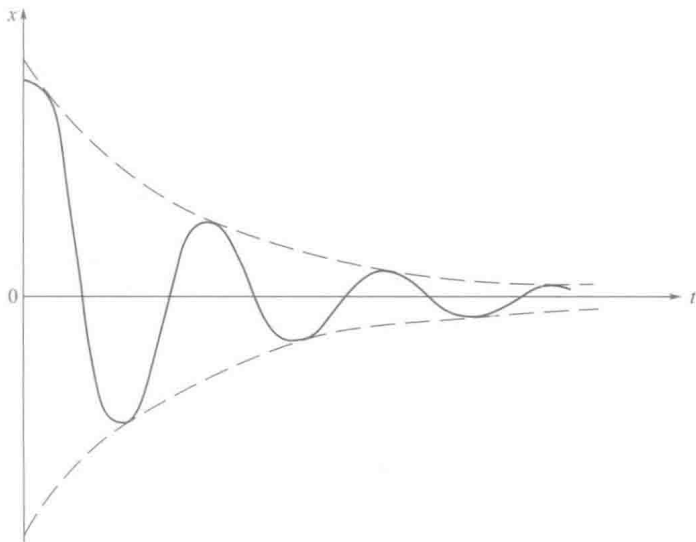


图 1-3 阻尼振动的典型振动曲线

的时间要久些。阻尼增加，周期也相应地随之增大。

一般来说，阻力是速度的函数，对于小振幅的振动而言，可以近似认为阻力与速度成线性关系，即

$$F_R = -R dx/dt \quad (1-4)$$

式中， $R$  为阻力系数，也称力阻。式中出现负号表示阻力总是与系统的运动方向相反，将这一阻力项加到式(1-2)中，振动方程将变为如下形式：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1-5)$$

这就是阻尼振动方程，式中第一项为惯性力，第二项为阻力，第三项为弹性力。

### 1.1.3 强迫振动

在自然界中，摩擦和辐射产生的阻尼作用，只能减小而不能完全消除。因此，系统要持续不断地振动，就必须不断地补充能量，这就是通常说的强迫振动，亦称受迫振动。

设强迫力为

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (1-6)$$

式中  $F_0$ ——强迫力幅值；

$\omega$ ——强迫力角频率， $\omega = 2\pi f$ ；

$f$ ——强迫力的频率。

则强迫振动方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (1-7)$$

解式(1-7) 强迫振动方程可知：强迫振动的振幅和相位由强迫力的频率  $\omega$ 、物体固有振动频率  $\omega_0$  ( $\omega_0 = k/m$ ) 之间的关系决定，即由  $\omega m - k/\omega$  决定。如果系统的阻尼作用不大，当强迫力的频率趋近振动系统的固有频率时，系统的振动特别强烈，振幅将达到最大值，这种现象称之为“共振”。反之，当强迫力的频率远离振动系统的固有频率时，振动就减弱。如果系统的阻尼较大，即式(1-7) 中  $R$  的作用不能忽略，则系统的振动就较弱，共振现象也就不明显。

如图 1-4 所示为强迫振动时的共振曲线，共振系统的阻尼  $\alpha$  越小，共振曲线的最大值就越高，峰值也越明显。由于  $\alpha$  不会等于零，所以共振振幅不会无限大。

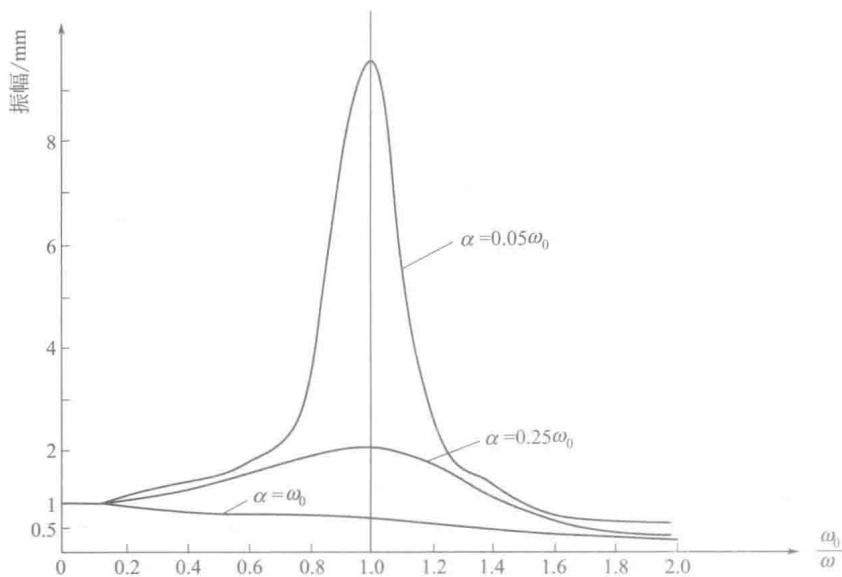


图 1-4 强迫振动时的共振曲线

$\omega m - k/\omega$  的大小与振动状态有极大关系，一般分为以下三种情况：

- ① 当  $\omega m \ll k/\omega$  (即  $\omega \ll \omega_0$ ) 时，式(1-7)左侧的第三项远远大于其他两项，则振动系统的特性主要由弹性力决定，此时称其为弹性控制或劲度控制。要实现弹性控制，就应当提高系统的固有频率  $\omega_0$ ，或降低工作频率  $\omega$ 。
- ② 当  $\omega m \gg k/\omega$  (即  $\omega \gg \omega_0$ ) 时，式(1-7)左侧的第一项远远大于其他两项，则振动系统的特性主要由物体的质量决定，此时称其为质量控制。要实现质量控制，就必须提高工作频率  $\omega$  或降低系统的固有频率  $\omega_0$ 。
- ③ 当  $\omega m \approx k/\omega$  (即  $\omega \approx \omega_0$ ) 时，式(1-7)左侧第一项与第三项相抵消，振动系统的特性主要由阻尼决定，此时称其为阻尼控制。要实现阻尼控制，就应当增大系统的阻尼，并使工作频率  $\omega$  接近系统的固有频率  $\omega_0$ 。

## 1.2 噪声及其分类

### 1.2.1 声音的产生

在日常生活中充满着各种各样的声音，有谈话声、广播声、各种车辆运动声、工厂的各种机器声等。人们的一切活动离不开声音，正因为有了声音，人们才能进行交谈，才能从事各种生产和社会实践活动。如果没有声音，整个世界将处于难以想象的寂静之中。可见声音对人类是非常重要的。那么，声音是怎样产生的呢？空气中的各种声音，不管它们具有何种形式，它们都是物体的振动所引起的。敲锣时听到了锣声，同时能摸到锣面的振动。喇叭发出声音是由于纸盆（音膜）在振动。人能讲话是由于喉头声带的振动。汽笛声、喷气飞机的轰鸣声，是因为排气时气体振动而产生的。总之，物体的振动是产生声音的根源。发出声音的物体称为声源。声源发出的声音必须通过中间媒质才能传播出去。人们最熟悉的传声媒质就是空气。除了气体外，液体和固体也都能传播声音。

声音是如何通过媒质传播的呢？现以敲锣为例，当人们用锣锤敲击锣面时，锣面振动，

即向外（右）运动，使靠近锣面的空气介质受压缩，空气介质的质点密集，空气密度加大；当锣面向内（左）运动时，又使这部分空气介质体积增大，从而使空气介质的质点变稀，空气密度减小。锣面这样往复运动，使靠近锣面附近的空气时密时疏，带动邻近空气的质点由近及远地依次推动起来，这一密一疏的空气层就形成了传播的声波，声波作用于人耳鼓膜使之振动，刺激内耳的听觉神经，就产生了声音的感觉。声音在空气中产生和传播如图 1-5 所示。

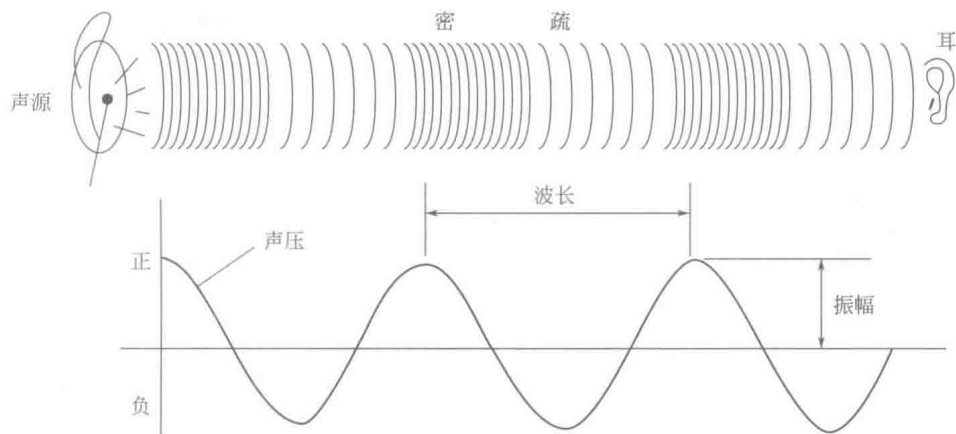


图 1-5 声音的产生和传播

声音在介质中传播只是运动的形式，介质本身并不被传走，只是在它平衡的位置来回振动。声音传播就是物体振动形式的传播，故声音亦称为声波。产生声波的振动源为声源。介质中有声波存在的区域称为声场。声波传播的方向称为声线。

物体振动产生声音，如果物体振动的幅度随时间的变化如正弦曲线那样，那么这种振动称为简谐振动。物体做简谐振动时周围的空气质点也做简谐振动。物体离开静止位置的距离称位移  $x$ ，最大的位移叫振幅  $a$ ，简谐振动位移与时间的关系可表示为  $x = \sin(2\pi ft + \varphi)$ ，其中  $f$  为频率，表示物体每秒钟振动的次数，单位为赫兹（Hz）。( $2\pi ft + \varphi$ ) 称作简谐振动的相位角，它是决定物体运动状态的重要物理量， $\varphi$  表示  $t = 0$  时的相位角，叫初相位。振幅  $a$  的大小决定了声音的强弱。

在图 1-5 中，声波两个相邻密部或两个相邻疏部之间的距离称为波长，或者说，声源振动一次，声波传播的距离称为波长。波长用  $\lambda$  表示，单位为米（m）。声波每秒钟在介质中传播的距离称为声速，用  $c$  表示，单位为米/秒（m/s）。波长  $\lambda$ 、频率  $f$  和声速  $c$  是三个重要的物理量，它们之间的关系为：

$$\lambda = c / f \tag{1-8}$$

人耳并不是对所有频率的振动都能感受到的。一般来说，人耳只能听到频率为 20～20000Hz 的声音，通常把这一频率范围的声音叫音频声（波）；低于 20Hz 的声音叫次声（波），高于 20000Hz 的声音叫超声（波）。次声（波）和超声（波）人耳都不能听到，但有一些动物却能听到，例如老鼠能听到次声（波），蝙蝠能感受到超声（波）。

声音不仅在空气中可以传播，在水、钢铁、混凝土等固体中也可以传播。不同的介质有不同的声速。如钢铁中的声速约为 5000m/s，水中约为 1450m/s，橡胶中为 40～150m/s。声速大小与介质有关，而与声源无关。空气是一种主要介质，其弹性与温度有关。

当温度高于 30℃ 或低于 -30℃ 时，声速由下式计算：

$$c=20.05\sqrt{T} \quad (1-9)$$

式中  $T$ ——绝对温度 (K),  $T=273+t$ ;

$t$ ——摄氏温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

当  $-30^{\circ}\text{C} \leq t \leq 30^{\circ}\text{C}$  时, 声速由下式计算:

$$c=331.5+0.61t \quad (1-10)$$

## 1.2.2 噪声的基本概念

物体的振动能产生声音, 声波经空气媒介的传递使人耳感觉到声音的存在。但是, 我们听到的声音有的很悦耳, 有的却很难听甚至使人烦躁, 那是什么道理呢? 从物理学的角度讲, 声音可分为乐音和噪声两种。当物体以某一固定频率振动时, 耳朵听到的是具有单一音调的声音, 这种以单一频率振动的声音称为纯音。但是, 实际物体产生的振动是很复杂的, 它是由各种不同频率的许多简谐振动所组成的, 把其中最低的频率称为基音, 比基音高的各频率称为泛音。泛音的多少决定声音的音色。人们能够区别不同人、不同乐器或不同物体发出的音调、强度一样的声音, 靠的就是这些声音的泛音不同。如果各次泛音的频率是基音频率的整数倍, 那么这种泛音称为谐音。基音和各次谐音组成的复合声音听起来很和谐悦耳, 这种声音称为乐音。钢琴、提琴等各种乐器演奏时发出的声音就具有这种特点。这些声音随时间变化的波形是有规律的, 而它所包含的频率成分中基音和谐音之间成简单整数比。所以凡是有规律振动产生的声音就叫乐音。

如果物体的复杂振动由许许多多频率组成, 而各频率之间彼此不成简单的整数比, 这样的声音听起来就不悦耳也不和谐, 还会使人产生烦躁。这种频率和强度都不同的各种声音杂乱地组合而产生的声音就称为噪声。如图 1-6 所示是乐音与噪声的波形及其频谱。各种机器噪声之间的差异就在于它所包含的频率成分和其相应的强度分布都不相同, 因而使噪声具有各种不同的种类和性质。从环境和生理学的观点分析, 凡使人厌烦、不愉快和不需要的声音都统称为噪声, 它包括危害人们身体健康、干扰人们工作与休息以及其他不需要的声音。

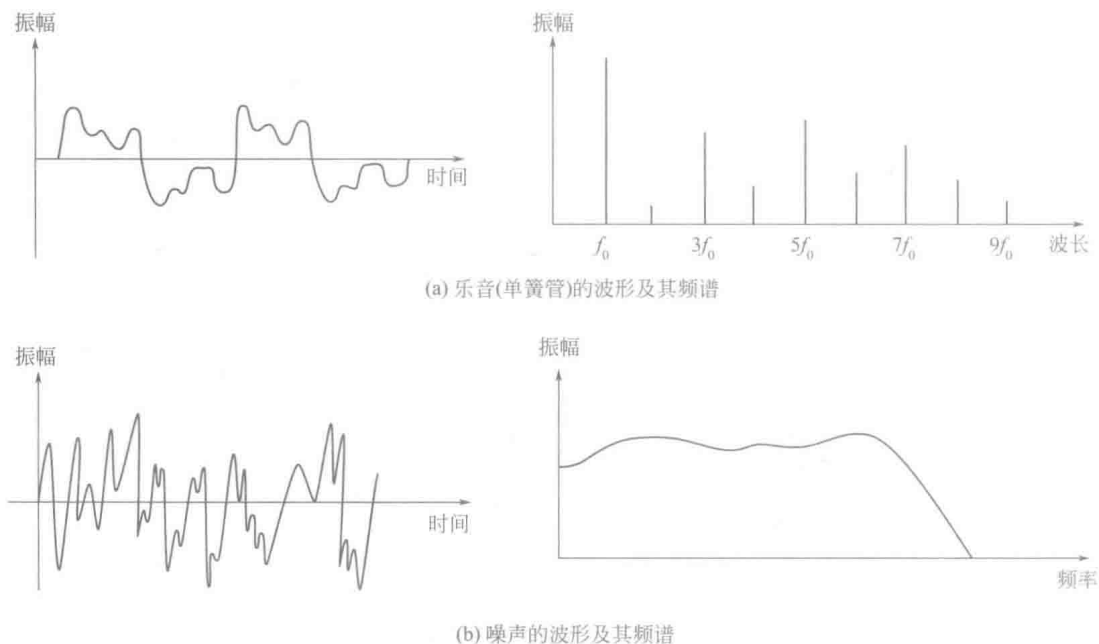


图 1-6 乐音与噪声的波形及其频谱

### 1.2.3 噪声的分类

噪声因其产生条件不同而分为很多种类,既有来源于自然界的(如火山爆发、地震、潮汐和刮风等自然现象所产生的空气声、地声、水声和风声等),又有来源于人为活动的(如工业生产、建筑施工、交通运输、社会生活等)。日常生活中噪声主要有过响声、妨碍声、不愉快声、无影响声等。过响声是指很响的声音,如喷气发动机排气声、大炮轰鸣声等;妨碍声是指一些声音虽不太响,但妨碍人们的交谈、思考、学习和睡眠;摩擦声、刹车声、吵闹声等称不愉快声;人们生活中习以为常的室外风声、雨声、虫鸣声等称无影响声。环境中出现的噪声,按辐射噪声能量随时间的变化可分为稳定噪声、非稳定噪声和脉冲噪声,按噪声的频率特性可分为高频噪声、低频噪声、宽带噪声、窄带噪声等。

影响城市声环境质量的噪声源按人的活动方式分为以下几类:

#### (1) 工业噪声

所谓工业噪声,是指在工业生产活动中使用固定的设备时产生的干扰周围生活环境的声音。工业噪声按其产生的机理可分为气体动力性噪声、机械噪声、电磁性噪声三种。

① 气体动力性噪声 叶片高速旋转或高速气流通过叶片,会使叶片两侧的空气发生压力突变,激发声波,如通风机、鼓风机、空气压缩机、发动机和锅炉等迫使气体通过进、排气口时传出的声音,此为气体动力性噪声。

② 机械噪声 机械噪声是由固体结构物振动产生的。物体间的撞击、摩擦、交变机械力作用下的金属板、旋转机件的动力不平衡,以及运转的机械零件轴承、齿轮等都会产生机械噪声,如球磨机、粉碎机、织布机、机床、机车和锻锤等产生的噪声。

③ 电磁性噪声 电磁性噪声是由电磁振动、电机等的交变力相互作用产生的噪声,如电流和磁场的相互作用产生的噪声,交流同步发电机、变压器的噪声。

工厂噪声不仅直接危害生产工人,也影响附近的居民。工业噪声中,电子工业和轻工业噪声在 90dB(A) 以下;纺织厂噪声为 90~110dB(A);机械工业噪声为 80~120dB(A),凿岩机、大型球磨机达 120dB(A),风铲、风钎、大型鼓风机在 130dB(A) 以上。

在城市范围内向周围生活环境排放工业噪声的,应当符合国家规定的《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348—2008)。

在工业生产中因使用固定设备造成环境噪声污染的工业企业,必须按照国务院环境保护行政主管部门的规定,向所在地的县级以上地方人民政府环境保护行政主管部门申报拥有的造成环境噪声污染的设备的种类、数量以及在正常作业条件下所发出的噪声值和防治环境噪声污染的设施情况,并提供防治噪声污染的技术资料。造成环境噪声污染的设备的种类、数量、噪声值和防治设施有重大改变的,必须及时申报,并采取应有的防治措施。

产生环境噪声污染的工业企业,应采取有效措施,减轻噪声对周围生活环境的影响。

国务院有关主管部门对可能产生环境噪声污染的工业设备,应当根据声环境保护的要求和国家的经济、技术条件,逐步在依法制定的产品国家标准、行业标准中规定噪声限值。工业设备运行时发出的噪声值,应当在有关技术文件中予以注明。

#### (2) 建筑施工噪声

所谓建筑施工噪声,是指在建筑施工过程中产生的干扰周围生活环境的声音。

在城市市区范围内向周围生活环境排放建筑施工噪声的,应当符合国家规定的《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB 12523—2011)。

在城市市区范围内,建筑施工过程中使用机械设备,可能产生环境噪声污染的,施工单