

振动、冲击及噪声

测试技术

(第二版)

高品贤 编著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

振动、冲击及噪声测试技术

Zhendong Chongji ji Zaosheng Ceshi Jishu

(第二版)

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内 容 简 介

本书介绍了机械振动、冲击及噪声测试的基本理论、测试仪器和测试技术。主要内容有测试仪器的动、静态特性；传感器、放大器、滤波器、声级计等仪器的基本结构和使用方法；振动、冲击、噪声各种参量的测量方法和频谱分析；另外，还叙述了机械阻抗和模态分析的基本理论和测试方法。该书将测试技术、电子技术、信号分析和微机应用等融为一体，反映了现代测试技术的水平和发展方向。

本书可作为大学机械类专业本科生、研究生的必修书，也可供有关教师和工程技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

振动、冲击及噪声测试技术 / 高品贤编著. —2 版
—成都：西南交通大学出版社，2010.2
ISBN 978-7-5643-0576-5

I. ①振… II. ①高… III. ①机械振动—测试②力学
冲击—测试③噪声测量 IV. ①TH113.1②TB301③TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 024567 号

振动、冲击及噪声测试技术 (第二版)

高品贤 编著

*

责任编辑 李芳芳

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码：610031 发行部电话：028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸：185 mm×260 mm 印张：10.875

字数：270 千字

1992 年 4 月第 1 版

2010 年 2 月第 2 版

2010 年 2 月第 2 次印刷

ISBN 978-7-5643-0576-5

定价：18.50 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

第二版前言

随着计算机技术的飞速发展，机械振动、冲击及噪声测试技术也得到了长足的进步，在测试理论和测试技术上都出现了许多新的方向，不少新理论、新技术已得到广泛应用。本书再版的目的是在保留基础理论、基本方法和基本技术的前提下，尽可能多地将新理论、新方法和新技术引入到教学中。

二版中主要做了如下几个方面的修改：

1. 删去了过时的仪器仪表（包括一些传感器）和测试系统内容，增加了部分现代仪器和现代测试系统内容。
2. 对一版中的文字、语法、公式和图表中的错误进行了更正。
3. 增加了部分新的测试理论和信号分析理论内容。
4. 加强了数字信号处理内容。
5. 删去了已停止执行的国标，引入了新的标准。

本书仍以教学为目的，由于这是一本实践性很强的学科，所以本书对工程技术人员和科研工作者也具有很好的参考价值。二版中可能仍存在疏漏与不妥之处，敬请读者指教。

本书在二版编写和出版过程中，得到了国家牵引重点实验室主任张卫华教授和曾京教授的热情支持，西南交通大学出版社编辑部为本书做了细心认真的审校，在此一并对他们表示衷心的感谢。

作 者

2009年12月于西南交通大学

第一版序

振动、冲击及噪声测试技术是在振动及噪声理论的基础上,结合近代电子学、计算技术、测量分析技术等综合发展起来的学科。随着现代工业的高速发展,大量的工程振动问题及噪声问题不断涌现,使这一学科深为工程技术部门所共同关心。

对于运行中的重要设备,不仅要在设计中预测振动、控制振动,而且要在使用期间随时进行状态监测和故障诊断,以防患于未然。振动、冲击和噪声测试技术在机器运行监控和故障诊断学科中得到了广泛应用。

由于振动、冲击和噪声问题的复杂性,理论研究和实验研究工作必须紧密结合,而且在很多情况下,实际测试工作有其特殊的重要性;有些问题甚至主要依靠测试的方法进行研究。

当前我国铁路运输中的重载列车,在起动及制动时列车纵向振动及冲动显得比较严重,甚至影响行车安全,有赖于理论研究和对振动、冲击的实际测量相结合来加以解决。正在开发中的准高速及高速旅客列车的振动问题、噪声问题、舒适性问题等,都是非常重要的研究课题。要解决这些问题,也离不开振动、冲击及噪声测试技术。

鉴于振动、冲击及噪声测试在机械工程中的重要性,我校硕士研究生机车车辆专业、工程机械专业确定“振动、冲击及噪声测试技术”为学位课程,机械类其他专业和一般力学专业确定为必修课程。高品贤同志承担该课程的讲授任务,深感没有合适的教学用书,决心自己编写。八年来,根据教学经验,对本书初稿不断加以修订补充,并结合自己多年来丰富的科研实践经验,完成了本书的编著任务,以应教学急需。本书的特色是在阐述振动、冲击和噪声测试技术基本原理和方法的同时,突出新理论、新技术的应用,反映了当代国内外本学科的科学技术先进水平。而且注意加强理论与实际的联系,内容的取舍也都经过仔细推敲,以适合作为教学用书。

相信本书作为机械类硕士研究生教学用书及本科高年级学生的参考书,一定会得到读者的欢迎;对从事振动、冲击及噪声测试工作者,也会提供很多有用的参考资料。

面对内容丰富的本书原稿,我钦佩作者坚韧不拔的努力,并预祝本书出版成功。

鲍维千
1991年

目 录

绪 言	1
第 1 章 基础知识	7
1.1 机械振动过程	7
1.1.1 简谐振动	7
1.1.2 复杂周期振动	8
1.1.3 准周期振动	9
1.1.4 随机振动	10
1.1.5 振动的耦合	11
1.1.6 振动测量中的对数量纲	11
1.2 冲击过程	12
1.2.1 冲击响应谱	13
1.2.2 冲击谱	13
1.3 声学噪声	14
1.3.1 声 压	14
1.3.2 声 强	15
1.3.3 声功率	15
1.3.4 声级和分贝	15
1.3.5 方向系数	16
第 2 章 振动、噪声测量仪器的主要特性	17
2.1 测量仪器的静态特性	17
2.2 仪器的动态特性	18
2.2.1 阶跃响应	18
2.2.2 正弦响应	20
2.3 振动传感器的静态特性	21
2.3.1 振动传感器的灵敏度	21
2.3.2 横向效应及横向灵敏度	22
2.3.3 相对灵敏度	22
2.3.4 温度特性	23
2.4 传感器的动态特性	24
2.4.1 幅频特性	24
2.4.2 传感器的相位特性	26
2.4.3 传感器的其他特性	26
2.5 传声器灵敏度和频响特性	27
2.5.1 传声器的灵敏度	27
2.5.2 传声器的频率响应特性	28
2.6 传感器的误差及信噪比	29
2.6.1 传感器的误差	29
2.6.2 传感器的信噪比	29

第3章 振动、噪声测量传感器	31
3.1 惯性式传感器	31
3.1.1 惯性式位移传感器	31
3.1.2 惯性式速度传感器	32
3.1.3 惯性式加速度传感器	33
3.2 电测传感器	34
3.2.1 发电式电测传感器	34
3.2.2 参数式电测传感器	34
3.3 压电晶体式传感器	38
3.3.1 工作原理	39
3.3.2 测试系统的等效电路及其影响	42
3.3.3 压电加速度传感器的安装	44
3.3.4 加速度传感器对冲击测量的影响	44
3.4 应变式加速度传感器	46
3.5 电容传声器	47
3.5.1 结构及换能原理	47
3.5.2 电容传声器的使用与保养	48
第4章 振动、噪声测量系统	50
4.1 测量系统中的微、积分电路	50
4.1.1 RC微分电路	50
4.1.2 RC积分电路	52
4.1.3 微分电路的对数幅频曲线	53
4.1.4 积分电路的对数幅频曲线	54
4.1.5 有源微、积分电路	55
4.2 前置放大器	56
4.2.1 电压放大器	57
4.2.2 电荷放大器	58
4.3 有效值、峰值检测器	58
4.3.1 有效值检测电路	59
4.3.2 峰值检测器	59
4.4 模拟滤波器	60
4.4.1 模拟滤波器的基本特性	60
4.4.2 巴特沃思滤波器的电路实现	63
4.4.3 几种典型的带通滤波器	70
4.5 声级计	74
4.5.1 声压与声压级	74
4.5.2 计权网络	74
4.5.3 输入级	76
4.5.4 声级计的校准	76

第5章 振动、冲击模拟量测量	77
5.1 复杂周期振动的频谱分析	77
5.1.1 扫描分析法	77
5.1.2 带通滤波器的分析	79
5.2 实时频谱分析	81
5.2.1 平均化操作	81
5.2.2 并联带通滤波器分析法	82
5.2.3 时基压缩法	82
5.2.4 快速傅里叶变换与数字滤波	83
5.3 随机振动测量	84
5.3.1 随机振动的基本特性	84
5.3.2 随机振动参数的测量	86
5.3.3 随机振动信号的特性检验	93
5.4 冲击谱分析	98
5.4.1 冲击傅里叶谱分析	98
5.4.2 冲击响应谱分析	102
第6章 噪声的测量方法	103
6.1 噪声级的测量方法	103
6.1.1 测点选择及布置	103
6.1.2 平均声级的确定	106
6.1.3 本底噪声的修正	106
6.1.4 声场混响修正	107
6.2 声压级频谱分析	109
6.2.1 声压级的频谱分析方法	109
6.2.2 有关分析参数的选择	110
6.3 声功率测量	111
6.3.1 自由声场中声功率的计算	111
6.3.2 混响声场中声功率的计算	111
6.4 声强测量	112
6.4.1 双传声器互谱声强测量方法	112
6.4.2 扫描声强测量技术	113
第7章 振动、冲击及噪声数字信号分析	115
7.1 基本知识	115
7.1.1 模拟信号抽样	115
7.1.2 抽样信号的量化	116
7.1.3 抽样定理	116
7.2 数字信号预处理	117
7.2.1 趋势项及产生原因	117
7.2.2 平均斜率法消除趋势项	118

7.2.3	最小二乘法消除趋势项	119
7.2.4	数字信号的平稳性、周期性和正态性检验	120
7.3	数字信号的时域分析	120
7.3.1	周期信号的幅值分析	120
7.3.2	随机数字信号的统计特征分析	120
7.4	数字信号的频域分析	121
7.4.1	离散傅里叶变换 (DFT)	121
7.4.2	加窗处理	123
7.4.3	随机信号自功率谱密度函数的计算	125
7.4.4	两随机信号互功率谱密度函数的计算	127
7.4.5	频率响应函数的计算	128
7.4.6	相干函数的计算	128
7.5	数字滤波分析	129
7.5.1	数字滤波器的串联与并联	129
7.5.2	有限冲激响应数字滤波器 (FIR) 窗口法设计	130
7.5.3	有限冲激响应数字滤波器 (FIR) 频率抽样法设计	132
7.5.4	无限冲激响应数字滤波器 (IIR) 冲激响应不变法设计	134
7.5.5	无限冲激响应数字滤波器 (IIR) 双线性变换法设计	135
7.5.6	利用信号与系统仿真软件设计滤波器	138
第 8 章	机械阻抗测量及模态分析原理	140
8.1	基本知识	140
8.1.1	机械阻抗的概念	140
8.1.2	单自由度系统的机械导纳	141
8.1.3	多自由度系统的机械导纳	143
8.2	机械阻抗测量	144
8.2.1	稳态正弦测试法	144
8.2.2	瞬态测试法	144
8.3	模态分析的基本原理	146
8.3.1	振动系统的模态	146
8.3.2	模态分析原理	147
8.4	模态参数识别	148
8.4.1	图解法	149
8.4.2	频率域最小二乘迭代法 (优化法)	152
8.4.3	时域最小二乘迭代法	155
8.4.4	IBRAHIM 时域识别法	159
8.4.5	模态分析系统	161
参考文献		163

绪 言

本课程介绍振动、冲击及噪声测试的基本理论、方法、技术、仪器以及振动和噪声信号分析处理技术。

一、振动理论与振动测试

“振动理论”是物理、数学及工程技术领域的基础理论，同时它又是一个相对独立的学科。电磁振动、光学、声学、无线电技术及应用学、机械振动、动力学、医学诊断等，都是以振动理论为基础的。

“振动测试”是研究振动、解决工程技术问题的重要方法，称为振动的实际解。振动、冲击及噪声测试技术是仪器仪表学科的主要研究领域之一。

二、振动测试的重要性

振动、冲击和噪声是自然界和工程中普遍存在的运动现象，是运动的主要形式。

- (1) 振动测试是动力学研究的重要内容。
- (2) 振动测试使产品设计从静态上升为动态设计。
- (3) 振动测试是实现自动控制的重要手段。
- (4) 振动测试检验产品的质量性能，几乎所有的产品都要进行振动试验。
- (5) 振动测试是运行设备工况监测的基础工作。
- (6) 振动测试是研究振动的重要方法。

三、振动在工程中的应用

振动实现了电磁波的传播，振动与冲击运动实现了自动控制。振动、冲击在工程机械中被广泛应用，例如：

- (1) 风镐的振动打通了隧道，开采了矿藏。
- (2) 空气锤的冲击实现了锻造。
- (3) 夯土机的振动与冲击夯实了地基。
- (4) 搅拌机的振动搅匀了混凝土和各种混合物。
- (5) 车辆等交通工具的适度振动使人感到舒适。

(6) 话筒、音箱的振动产生了声音和音乐。

(7) 振动为医学诊断提供了先进技术。

四、振动的危害性

(1) 强烈而持续的振动会造成机械设备疲劳甚至破坏。

(2) 强烈的冲击会造成机械设备瞬时超越破坏。

(3) 超过极限的振动、冲击会造成设备失效。

(4) 超过极限的振动、冲击会导致动态性能下降。

(5) 强烈的振动会给人体健康带来危害。例如, 2.5~5 Hz 的振动可引起颈椎、腰椎共振; 20~30 Hz 的振动可引起肩与关节的共振。

(6) 振动冲击产生噪声, 噪声会造成环境污染。

五、振动测试的基本原理

振动测试的核心问题是: 从振动系统中拾取信号, 经分析处理后获取信息, 用来干预系统的工作。

1. 信号的概念和主要特点

信号 (Signal) 是物质运动的表现形式, 或者说是随着时间变化的某种物理量。

信号可以理解为函数 $f(t)$ 或序列 $f(n)$, 在数学上可以表示为一个或 n 个独立变量的函数, 也可以用声、光、电、文字、符号、图形、图像来表示。

不管是何种信号, 它总蕴涵着某种信息, 所以信号是传输信息的载体。

2. 信息的概念和主要特点

信息 (Information) 是反映一个物理系统的状态或特性的预先不知道的报导; 信息本身不是物质, 不具有能量, 但信息却是物质所固有的, 是事物运动的状态和方式, 是用来消除不确定性的一种东西。

信息是通过信号传递的, 是从信号中获取的。

信息可以识别, 可以转换, 可以存储, 可以传输。

3. 测试

测试 (Measurement) 是人们认识客观事物的方法, 是获取信息的一种手段。

测试过程是从客观事物中提取有关信息的认识过程, 是对“现象”的检测和对所检测到的信号进行分析与处理, 即获取信号和从信号中提取信息。它主要包括四个部分:

检出 → 变换 → 分析处理 → 判断

现代测试系统以计算机为主体, 能实现自动测试和控制, 所以又称为测控系统。

4. 信号分类

常用的几种分类法有: 按信号性质分类、按变量取值的方式分类、按因果关系分类和按能量性质分类等。

(1) 按信号性质分类。

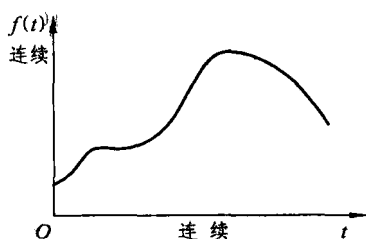
① 确定性信号：信号随时间的变化服从于某种确定规律，能用确定的数学函数描述，对于任意确定的时刻，信号有确定的函数值。确定性信号有：周期信号和非周期信号两种。

② 随机信号：信号的取值在不同时刻是随机变化的，不能预先确切地知道它的变化规律，只能用数理统计的方法来加以研究。随机信号有平稳性随机信号和非平稳性随机信号两种。

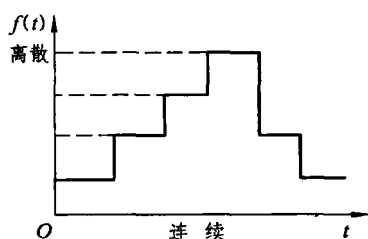
(2) 按变量取值的方式分类。

① 时间连续信号 (Continuous-time Signal)：是一种关于时间 t 连续的信号，分为模拟信号 (Analog Signal) 和量化信号，如图 1 (a)、(b) 所示。

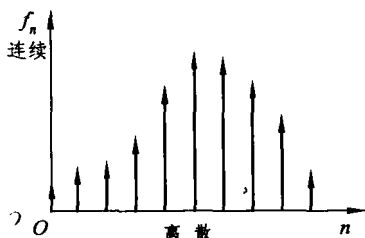
② 时间离散信号 (Discrete-time Signal)：是一种关于时间 t 离散的信号，分为抽样信号和数字信号 (Digital Signal)，如图 1 (c)、(d) 所示。



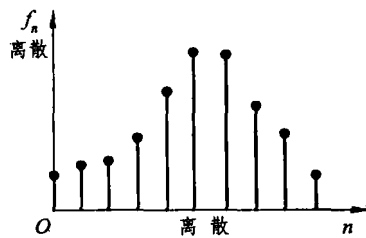
(a) 模拟信号



(b) 量化信号



(c) 抽样信号



(d) 数字信号

图 1 信号分类

(3) 按因果关系分类。

如果一个信号只在自变量的非负半轴，即左闭区间 $[0, +\infty)$ 才取非零值，而在开区间 $(-\infty, 0)$ 内取值均为 0，则该信号称为因果信号 (Causal Signal)；否则就称为非因果信号。

(4) 按能量性质分类。

信号的能量为有限时，称为能量有限信号，如衰减的周期信号或有限长的非周期信号（持续时间有限）。能量信号定义为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt < \infty$$

对于周期信号，其能量为无穷大，这时只能用平均功率来表达信号的能量，故称为功率信号。信号的平均功率定义为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt$$

其中， T 为平均周期。功率信号又分为周期信号、随机信号及不衰减的非周期信号等。

5. 信号分析与处理

信号分析与处理 (Signal Analysis and Processing) 包括两方面的内容：

(1) 信号分析。将复杂的信号分解成若干便于识别的简单信号，如正、余弦信号，直流信号，脉冲信号等，以便于提取所需信息。

(2) 信号处理。对原始信号进行加工、变换，去伪存真，以便获取所需分析的信号。如滤波，变换，调制、解调，编码、解码，增强或衰减等。

信号分析与处理是一种复合关系，分析中包含有处理，处理中包括有分析。

6. 信号分析方法

信号分析方法主要有三种：时域分析法、频域分析法和时-频分析法。

(1) 时域分析法：分析信号的波形 (Waveform)。通过时域分析，可以了解信号的时域特性，如波形的参数、波形的变化、信号的强度、时域相关特性、概率密度函数等。

(2) 频域分析法：分析信号的频谱 (Spectrum)。信号的频谱是信号幅度或功率随频率变化的关系，定义为信号的傅里叶变换 (FT)。通过频率分析，可以了解信号的频域结构，如幅度谱、相位谱、功率谱等。

(3) 时-频分析法：将时域分析与频域分析结合起来，是一种现代分析方法，特别适用于非平稳信号的分析处理，如短时傅里叶变换、小波分析等。

7. 系统的概念

系统 (System) 是由若干相互联系、相互作用的单元组成的具有一定功能的有机整体。

信号的产生、传输、分析与处理均离不开系统，而系统的性质往往是通过输入与输出信号间的关系来描述的。

系统的输入与输出可分为：单输入、单输出系统，多输入、多输出系统。

8. 系统的分类

系统分类的方法很多，主要有如下几种：

(1) 连续系统、离散系统、混合系统，分别如图 2 (a)、(b)、(c) 所示。

连续系统：系统的输入和输出都是连续时间信号，用微分方程来描述。

离散系统：系统的输入和输出都是离散时间信号，用差分方程来描述。

混合系统：连续系统与离散系统的组合。

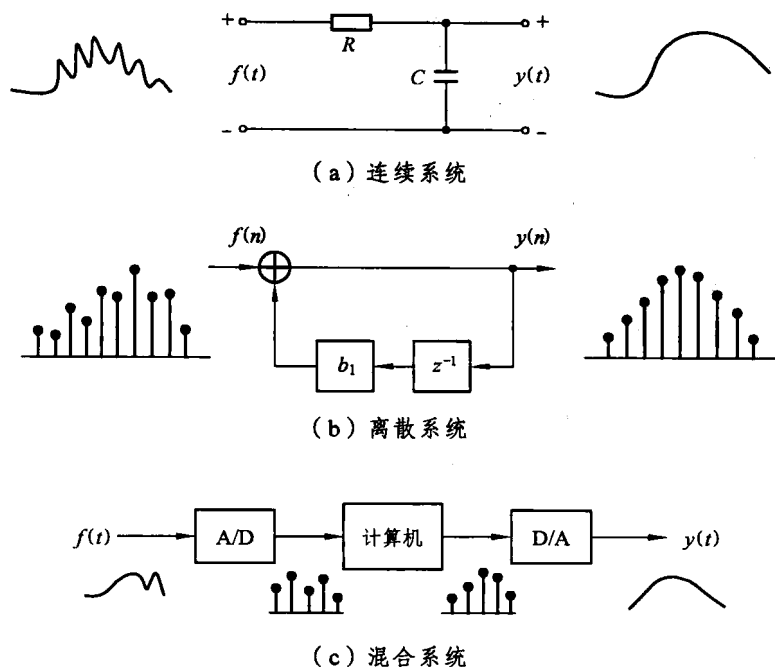


图 2 系统分类

(2) 时不变系统与时变系统。

时不变系统：描述系统方程的系数与时间无关，本身的参数不随时间而变化，在同样的起始状态下，其响应与激励时间无关，这就是时不变系统响应的时不变特性。

时变系统：描述系统方程的系数与时间有关。

(3) 线性系统与非线性系统。

线性包含两个重要的概念：叠加性和齐次性。

叠加性： $f_1(t) \rightarrow y_1(t)$, $f_2(t) \rightarrow y_2(t)$, $f_1(t) + f_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$;

齐次性： $f(t) \rightarrow y(t)$, $af(t) \rightarrow ay(t)$ 。

同时满足叠加性和齐次性的系统称为线性系统。线性系统用线性方程来描述。

非线性系统：用非线性方程描述的系统，不具有叠加性与齐次性。

(4) 线性时不变系统 (LTI)。

线性时不变系统：同时具有线性和时不变性，简记为 LTI (Linear Time Invariant)。该系统具有三个重要特性：微分特性、积分特性和频率保持特性。

微分特性： $\frac{df(t)}{dt} \rightarrow \boxed{\text{线性系统}} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt}$;

积分特性： $\int_0^t f(\tau) d\tau \rightarrow \boxed{\text{线性系统}} \rightarrow \int_0^t y(\tau) d\tau$;

频率保持特性：信号通过线性系统后不会产生新的频率分量。

(5) 因果系统与非因果系统。

因果系统 (Causal System)：其响应是激励所产生的结果，即有激励才有响应，又称物理可实现系统。其特点是：在 $t < 0$ 时，系统输入和输出恒为零。

非因果系统：响应与未来激励有关，响应在激励之前就已存在，这是一种物理不可实现系统，响应中的部分出现在激励之前，也就是说它与未来的激励有关。

(6) 线性时不变因果系统。

线性时不变因果系统是同时满足线性、时不变性和因果性的系统，是一种理想化的系统。在工程界中，有许多实际系统接近该系统。该系统的分析理论比较成熟，求解方便，能解决很多实际问题，是本课程的主要研究对象。

在一般情况下，都假定振动测试对象为线性时不变因果系统。

第1章 基础知识

1.1 机械振动过程

任何一个可以用时间的周期函数来描述的物理量，都称之为振动。更确切地说，与某个坐标系有关的、围绕其平均值（或基准值）从大变小，又从小变大，如此交替重复变化的量，称为振动（Oscillation, Vibration）。机械振动（Mechanical Vibration）是最常见的一种振动形式，在这种运动过程中，机械系统围绕着平衡位置作重复运动。

描述振动的量有：位移、速度和加速度，激振力和振动频率等。按照描述振动数据的特点，可将振动分为确定性振动和随机振动两大类，其中确定性振动又分为简谐振动、复杂周期性振动和准周期性振动。

1.1.1 简谐振动

位移、速度和加速度为时间的谐和函数的振动称为简谐振动（Simple Harmonic Motion），这是一种最简单最基本的振动形式，如图 1.1 所示。

$$\text{位 移} \quad x(t) = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t)$$

$$\text{速 度} \quad v(t) = \omega A \cos(\omega t) = \omega A \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.1)$$

$$\text{加速度} \quad a(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t) = \omega^2 A \sin(\omega t + \pi)$$

式中 A ——位移幅值，cm 或 mm；

ω ——振动圆频率，1/s；

f ——振动频率，Hz。

$x(t)$ 、 $v(t)$ 和 $a(t)$ 三者间的相位依次相差 $\pi/2$ ，如图 1.2 所示。

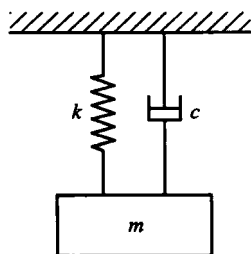


图 1.1 简谐振动

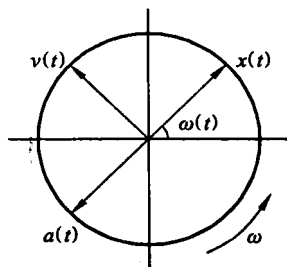


图 1.2 振动矢量图

若令：速度幅值 $V = \omega A$ ，加速度幅值 $a_0 = \omega^2 A$ ，则有

$$a_0 = \omega V = \omega^2 A = (2\pi f)^2 A \quad (1.2)$$

可见，位移幅值 A 和频率 ω （或 f ）是两个十分重要的量，速度和加速度的幅值 V 和 a_0 可以直接由位移幅值 A 和频率 f 导出。在测量中，振动参数的大小常用其有效值、峰值、均值、绝对均值等来表示。有效值（均方根值），反映了振动信号的强度；峰值是指振动量在给定区间内的最大值；均值是振动量在一个周期内的平均；绝对均值是振动量的绝对值在一个周期内的平均，在测量仪表上，有效值用 RMS（Root Mean Square），峰值用 Peak-Peak（峰-峰）表示，称为双峰值或峰-峰值。

上述各测量参数的表达式如下：

$$\text{均值} \quad \mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1.3)$$

其中， T 为测量周期。均值表示振动信号中的静态分量，即直流分量。

$$\text{绝对均值} \quad \mu_{|x|} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (1.4)$$

绝对均值 $\mu_{|x|}$ 表示交变的振动信号经整流后的等效直流量。

$$\text{有效值} \quad x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1.5)$$

对于简谐振动，其位移峰值 x_{peak} 就是它的幅值 A ，而位移的有效值为

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} A$$

峰值与有效值之比，称为峰值因素（Crest-Factor）。简谐振动的峰值因素为

$$F_p = \frac{A}{x_{\text{RMS}}} = \sqrt{2} = 1.414 \quad (= 3 \text{ dB})$$

有效值与均值之比，称为波形因素（Form-Factor）。简谐振动的波形因素为

$$F_x = \frac{x_{\text{RMS}}}{\mu_{|x|}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad (= 1 \text{ dB})$$

峰值因素 F_p 和波形因素 F_x 反映了振动波形的特征，是机械故障诊断中常用来作为判据的两个重要指标。

1.1.2 复杂周期振动

复杂周期振动由一系列频比 f_i/f_j （或 ω_i/ω_j ）为有理数的简谐振动叠加而成，当自变量增加到某一定值时，其函数值又恢复到同一个值的振动，所以又简称为周期振动（Periodic Vibration），用周期性函数表示为