

机械振动与冲击 测试技术

胡时岳 朱继梅 编著

科学出版社

78.1131
376

机械振动与冲击测试技术

胡时岳 朱继梅 编著

内 容 简 介

本书主要讲述机械振动和冲击测试的基本问题和方法，并介绍振动测量和分析所使用的仪器、设备的工作原理。

本书可供高等学校有关专业师生参考，也可供有关科学技术工作者参考。

机械振动与冲击测试技术

胡时岳 朱继梅 编著

责任编辑 李成香

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年12月第一版 开本：787×1092 1/32

1983年12月第一次印刷 印张：16 3/8 插页：4

印数：0001—8,100 字数：374,000

统一书号：13031·2440

本社书号：3345·13-2

定 价：2.70 元

序 言

振动和冲击是自然界和工程中普遍存在的现象。几乎每一种机器和建筑都离不开振动问题。除了少数利用振动来进行运输、加工和打桩等情况外，振动所造成的严重危害是大家所熟知的。在工程技术史上曾发生过多次由于振动而形成的严重破坏事故。机械振动常常是影响机器的性能、寿命、噪声公害的主要因素。直到现在，振动和冲击问题在生产实践中仍然占着相当突出的位置。特别是随着机器日益高速化、大功率化、结构轻型化及其精密程度不断的提高，对控制振动的要求也更加迫切。由于振动现象和形成振动的机理变得更加复杂，不少振动和冲击的新课题也提了出来。

多年来，在长期生产实践和科学实验中逐渐形成了一整套关于机械振动的基本理论，可用以指导和解决某些生产实际问题。但这些理论终究还只是建立在相对来说较简单的力学模型上的，例如质量-弹簧-阻尼系统、均质有规则形状的弹性体系统等等。这些系统和实际机器还存在着一定的差别。近年来出现了适应性更广泛的分析计算方法，例如有限元法等，但所依据的模型和边界条件仍然不可能完全符合实际情况。尤其是对于复杂结构，或者牵涉到较复杂的非线性机理时，单靠现有的振动理论和数学方法来作分析判断，往往难于应付。所以在观察、分析、研究机械动力系统产生振动的原因及其规律时，除了理论分析之外，直接进行测试始终是一个重要的、必不可少的手段。目前复杂结构振动问题的解决一般仍借助于实验，或者依赖实验手段与理论计算相结合的办法。

要了解结构的动力特性或者抗振能力，通常是对实际机器或其结构模型进行振动试验。复杂结构的阻尼、刚度等参数以及所受载荷数据的取得，大都离不开实验。也只有在实验过程中，才能观察到振动的新现象，进而建立符合实际的、合理的简化模型，并检验现有理论的可靠性和适应性。因此，振动和冲击测试技术长时期以来一直作为科学研究和工程试验中一门重要的技术而不断得到发展。

近十年来，电子技术和数字计算技术的发展，使振动和冲击的测试技术相应地发生了极大的变化。测量传感器和测试仪器出现了许多新型结构，可测量的频率范围和动态范围大大增加。记录仪器和分析仪器向数字化方向发展，大量采用微处理器，可进行频率域和时间域的实时分析。振动试验方法也有了很大的革新。结构振动试验发展了多点激振技术，出现了许多快速试验方法，与小型或微型计算机联机分析，可以在几分钟，甚至更短时间内显示出测试数据和分析结果。环境模拟振动试验可以用微型电子计算机控制，作数字式模拟加载。试验过程实现了全自动化。这些试验方法与沿用方法相比，几乎已面目全非。

本书主要讲述机械振动和冲击测试的基本问题和方法，并介绍通用的振动测量和分析仪器、设备的工作原理。为了适应当前振动试验方面突飞猛进的进展，还尽量引进当前发展中的新方法、新设备。内容涉及比较广泛，除了环境模拟试验之外，几乎包括了振动和冲击测试技术新发展的各个方面。希望通过本书能使读者了解七十年代振动试验技术新成就的概貌。

本书第一章叙述了机械振动和冲击测试技术的一些基本内容和基本要求。第二章介绍机械式测振仪，包括“质量-弹簧”型传感器的基本原理。第三章介绍各种传感器的结构和

工作原理，叙述了使用上应注意之点，并分析了它们的优缺点。第四章内容比较庞杂，全面介绍了振动测量常用线路，专门仪器以及由它们组成的几种主要的测量系统。对每一种系统尽可能地作出原理上的分析，指出其测量误差之所在。在本章中特别着重介绍了振动分析中最基本的频谱分析方法，对常用的几种频谱分析仪作了不同的剖析。此外本章还介绍了冲击的测量和分析。这一部分原来打算另立专门一章“冲击测量”来加以叙述以表示它的测量特点。后来考虑到冲击测量所用的仪器和方法实质上与振动测量可以通用，另立专章也许会造成重复，所以最后还是把它分散在本章各节之中了。第五章很简单地介绍测振的光学法，重点是激光全息术的时间平均法。第六章集中叙述随机振动测量。从简略地介绍随机振动的基本概念开始较系统地说明了各种参数测定的方法和程序。随机振动测量中一个很重要的问题是对测量误差的估计，本章着重对估计方法从基本原理上作了叙述。第七章激振设备写得比较简单，只介绍了激振器和振动台的本体，指出了使用中应注意之点，而对其控制系统只略加说明。这对于只是使用激振设备作振动试验而不是设计激振设备的读者来说，也许已足够了。第八章校准技术，同样是根据从事振动试验工作的读者的需要来写的，对于专门从事振动计量工作的读者来说，可能会嫌过于简略。第九章专门介绍振动测量中的数字技术。第十章介绍结构振动试验方法。这最后两章的主要内容，大体上都是六十至七十年代中期出现的新技术和新方法。希望通过这二章的介绍，能够对振动测量的新发展有所了解。从内容所涉及的面来说，对数字技术及试验方法上的新进展基本上都接触到了。

本书可作为高等院校理工科专业振动测量课程的教学参考书。给从事振动和冲击测量的科技工作者作为参考，也是

合适的。使用本书的读者，需要具备机械振动及电子线路方面的基本知识，对随机振动测量部分，还要求有初步的数理统计方面的知识。

本书的第一至第五章，第七、八章的部分内容曾在西安交通大学应用力学专业作为“振动测量技术”课的讲义，对三届学生讲授过，并在四机部举办的振动学习班上试用过。本书就是在这样的基础上编写成的。

本书的第一章至第九章由胡时岳编写，第十章由朱继梅编写。全书由朱继梅审阅后，又作了进一步的修订和补充。由于水平有限，实践经验不够，不当之处难免，请不吝指正。

胡时岳 朱继梅

1979.5.

目 录

序言	iii
第一章 概述	1
§ 1-1 机械振动量的描述	1
§ 1-2 振动和冲击测试技术的基本内容	10
§ 1-3 机械振动和冲击测量仪器的主要特性参数	12
附录 傅里叶级数与傅里叶积分	15
第二章 机械式测振仪	26
§ 2-1 直接式(手持式)机械测振仪	26
§ 2-2 “质量-弹簧”型测振仪(传感器)特性分析	30
§ 2-3 Geiger 测振仪	35
§ 2-4 振动记录曲线的分析	44
第三章 机械振动测量传感器	51
§ 3-1 电磁感应式传感器	52
§ 3-2 压电晶体式传感器	59
§ 3-3 电参数式传感器	82
第四章 振动测量系统、分析方法及仪器	102
§ 4-1 振动测量系统	102
§ 4-2 振动时间量的测定	134
§ 4-3 频谱分析法	142
§ 4-4 冲击响应谱的测定	183
§ 4-5 振动记录设备	196
第五章 机械振动测量的光学法	217
§ 5-1 利用眼睛视觉的滞留作用进行振动观察的测量法	217
§ 5-2 全息摄影法测量振动	219
第六章 随机振动测量	233
§ 6-1 随机振动的基本概念及其描述方法	233
§ 6-2 随机振动测量方法	255

第七章	激振设备和冲击试验机	295
§ 7-1	激振设备的基本技术参数	296
§ 7-2	机械振动台	297
§ 7-3	电动振动台	302
§ 7-4	激振器	308
§ 7-5	冲击试验机	318
§ 7-6	在电动或电动液压振动台上重现冲击激励运动的新方法	323
§ 7-7	激振控制	330
第八章	校准技术	341
§ 8-1	校准试验的基本任务	341
§ 8-2	“Chatter”方法校准压电加速度传感器	342
§ 8-3	“绝对法”校准传感器	344
§ 8-4	“比较法”校准传感器	352
§ 8-5	共振梁校准法	355
§ 8-6	加速度传感器冲击校准法	356
§ 8-7	横向灵敏度的测定	359
第九章	振动与冲击数据数字分析简介	361
§ 9-1	基本知识	361
§ 9-2	快速傅里叶变换	396
§ 9-3	数字滤波器原理	409
§ 9-4	功率谱密度与相关函数的数字分析法	417
§ 9-5	振动系统的频率特性与凝聚函数数字估计	432
§ 9-6	冲击响应谱数字分析法	446
第十章	振动试验和分析方法	453
§ 10-1	概述	453
§ 10-2	稳态正弦波频率扫描试验	457
§ 10-3	机械阻抗测量	461
§ 10-4	机械阻抗测量数据的处理与分析	478
§ 10-5	快速激振试验方法	502
§ 10-6	时间域的分析方法	510
参考文献		513

第一章 概 述

§ 1-1 机械振动量的描述

本节的基本内容在一般的“机械振动”书中都有介绍，为了使我们振动与冲击测量对象的特点有更明确的了解，在这里作一简要叙述。

机械振动是指机械动力系统随时间变化而作的来回振荡运动。这一运动用下面一些量来描写：位移、速度、加速度；此外还有机械动力系统产生振动的原因——激振力。按照振荡运动的不同形式，可以区分为如下几种运动。

(一) 简谐振动

如图 1-1 所示，若位移、速度、加速度等运动量随时间按谐和函数变化，则称这种运动为简谐振动。简谐振动的位移函数 x 为

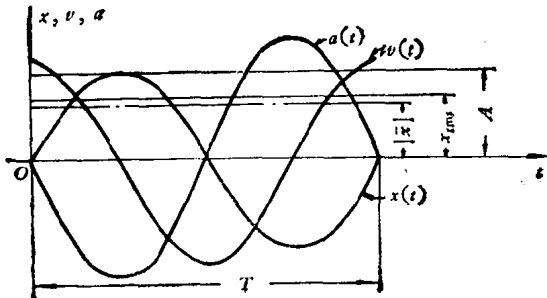


图 1-1

$$x = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$$

其中, A 为位移幅值, 它指简谐振动物体离开平衡位置的最大距离(毫米或微米); ω 为振动角频率(弧度/秒); $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 为振动频率(赫); $T = \frac{1}{f}$ 为振动周期(秒)。

简谐振动的速度 v 为

$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t) = 2\pi f A \cos(\omega t) \\ &= V \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

其中, $V = \omega A = 2\pi f A$ 是简谐振动的速度幅值。振动的速度是指振动位移函数对时间的一阶导数。

简谐振动的加速度 a 为

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t) = a_0 \sin(\omega t + \pi)$$

其中, $a_0 = \omega^2 A$ 是简谐振动的加速度幅值。振动的加速度是指振动速度函数对时间的一阶导数, 或者指振动位移函数对时间的二阶导数。

简谐振动的特点是, 位移、速度、加速度随时间变化规律都是同频率的谐和函数。它们的幅值之间存在着下列的简单关系:

$$a_0 = \omega V = \omega^2 A \quad (1-1)$$

它们的相位关系是速度波形超前位移波形 $\frac{\pi}{2}$, 加速度波形又超前速度波形 $\frac{\pi}{2}$ 。

在简谐振动中, 幅值与频率是两个很重要的特征量。另外, 还有一个很有用的特征量, 即振动量的均方根值或有效值

(RMS). 有效值的定义如下: 例如对位移振动量 x

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

此值的重要性在于, 它与振动信号的能量内容有直接关系. 对简谐振动, 位移的有效值为

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

在这里, 我们引入一个新的参数-峰值因素. 峰值因素定义为振动量的峰值与有效值的比值, 用符号 F_c 表示. 峰值是指振动量在给定的时间区间内的最大值. 对于简谐振动, 就将它的周期取为给定的时间区间, 峰值就等于它的幅值. 因此, 简谐振动的峰值因素为

$$F_c = \frac{A}{x_{\text{RMS}}} = \sqrt{2} \quad (1-3)$$

(二) 周期振动

图 1-2 (a) 表示某一柴油机曲轴扭转振动曲线. 它的特点是波形每经过时间间隔 T 就重现一次. 我们称这种振动为周期振动. 周期振动是指每经相同的时间间隔, 其振动量能重

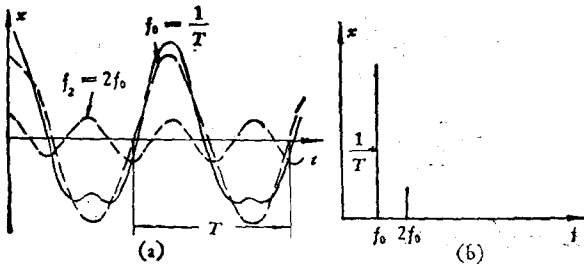


图 1-2

复出现的振动。显然，简谐振动是最简单的周期振动。周期振动的一般数学表示式为

$$x(t) = x(t + nT) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

其中 T 是波形最短重复时间，称为周期。对周期振动，峰值和周期也是两个特征量。但是，要深入地分析这类振动，仅有这两个值还是很不够的。通常，周期运动可以分解为一系列简谐运动之和。我们从图 1-2(a) 的曲线中看出，它是由虚线 1 与虚线 2 两条谐和曲线叠加起来的，虚线 1 的幅值为 A_1 ，角频率为 ω_1 ，称为基频， $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ ， T 是周期振动的周期。虚线 2 的幅值为 A_2 ，它的角频率为 $\omega_2 = 2\omega_1$ ， ω_2 称为倍频。同样，对复杂的周期振动也可以用这种方法进行分解，得到一条基频曲线和一系列倍频(二倍、三倍……)曲线，而这些分解的谐和曲线又只要用它们本身的幅值与频率来表示。我们称这种分析法为频谱分析法。

频谱分析法是基于数学上的傅里叶级数原理。亦即，任何周期振动都可分解成一系列简谐振动，其中有一个基波，它的角频率 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 称为基频，而其余简谐振动称为谐波，它们对应的频率为基频的整数倍。各谐波的幅值由傅里叶级数的系数确定。它的数学表示式为

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t - \theta_n) \end{aligned} \quad (1-4)$$

其中

$$\begin{aligned} c_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \theta_n &= \arccos \frac{a_n}{c_n} = \arcsin \frac{b_n}{c_n} \end{aligned}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin n\omega t dt$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt = \bar{x}$$

系数 c_n 就是第 n 次谐波分量的幅值。把各谐波分量的幅值称为傅里叶的幅频谱, 而把各谐波分量的相位差 θ_n 称为相频谱。

以频率为横坐标, 以基波、高次谐波的幅值 c_n (或有效值 c_{nRMS}) 及相位差 θ_n 为纵坐标, 分别绘出的曲线图, 称之为频谱图(幅频谱与相频谱)。在工程中, 常采用两种形式的频谱图, 即线性坐标与对数坐标。幅频谱图表示周期振动由哪些频率成分组成, 以及说明每个简谐振动在这一周期振动中所占的比例大小。周期振动频谱图其特点是由一些离散型直线段构成。图 1-2 (b) 是 (a) 曲线的幅频谱图, 它表示 (a) 曲线振动由两个频率为 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 与 $\frac{4\pi}{T}$ 的简谐振动合成。在图 1-3 (b) 里, 画出如图 1-3 (a) 曲线所示的矩形周期振动的幅频谱图。它的

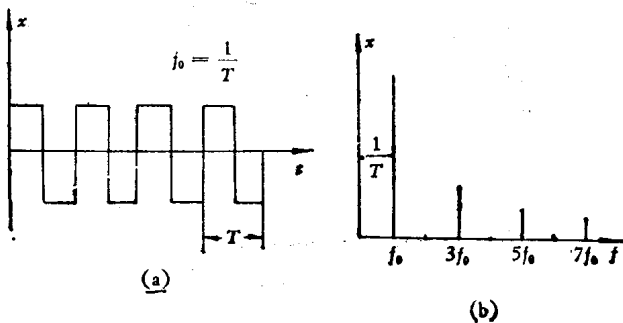


图 1-3

特点是有无限多个简谐振动合成，它的基频 $f_0 = \frac{1}{T}$ ，高次简谐振动相互间的频率最小间隔亦为 $\frac{1}{T}$ ， T 是矩形周期振动的周期。另外，矩形周期振动的高次简谐振动的幅值随频率增高而迅速减小。

周期振动的各次简谐振动幅值的确定方法，傅里叶级数的系数确定方法一般有三种：分析计算法、图解计算法和仪器分析法。这些内容将在有关章节里介绍。

(三) 非周期振动

若描写机械振动量随时间变化的曲线是非周期的，就称它为非周期振动，如图 1-4 (a), (b) 曲线所示。在工程实际中，最常见的非周期振动是冲击与暂态振动。例如，在飞机着陆、地震、爆炸、车辆或船舶之间的碰撞、落锤与砧基的碰撞时所产生的振动都是典型的冲击与暂态振动。它们的共同特点是过程突然发生、持续时间短暂，能量却很大。

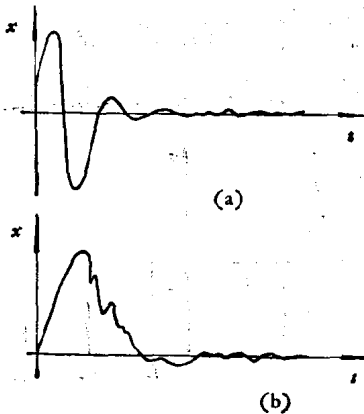


图 1-4

在研究冲击作用于机械动力系统所产生的影响时，仅仅有冲击随时间变化曲线还远远不够。为了进一步分析，频谱分析法仍是十分有效的方法。非周期振动的频谱分析法与周期振动频谱分析法基本思想类似，不同之点是周期振动的频谱分析法是基于傅里叶级数展开，而非周期振动的频谱分析法则基于傅里叶积分法，统称它们为傅里叶变换。它是把一个时间域的振动信号转变到频率域的函数。

傅里叶积分的数学表示式如下：如果一个冲击信号为 $x(t)$ ， $0 \leq t \leq \tau$ ， τ 为持续时间，则它的傅里叶积分(频谱)有

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1-5)$$

f 为频率变量。 $X(f)$ 是频率 f 的复函数。把 $X(f)$ 转化成模 $|X(f)|$ 与相位角 $\theta(f)$ 的形式，则有

$$X(f) = |X(f)|e^{j\theta(f)} \quad (1-6)$$

其中 $|X(f)|$ 与 $\theta(f)$ 都是 f 的实函数。把 $|X(f)|$ 绘成随频率变化的曲线，称为幅频谱曲线，而把 $\theta(f)$ 绘成随频率变化的曲线，称为相频谱曲线。

冲击信号的傅里叶频谱与周期振动的傅里叶频谱在物理概念上是有区别的。冲击信号的傅里叶频谱是冲击信号的谱密度函数，它是单位频率上的振动量大小(有效值)。冲击信号的傅里叶频谱函数是一条连续曲线，周期振动的傅里叶频谱是离散的直线条，而且它只在等间隔频率处出现。冲击信号的每个单独简谐振动的幅值将趋向无穷小。但它在某一频率上的频谱密度值大小仍表示出它对冲击信号的贡献大小，也就是说某频率上的频谱密度值愈大，那末它在此频率上的能量也愈大。冲击信号在频率 f 的简谐振动的幅值可由 $2|X(f)|df$ 来确定。另外须指出：前述的非周期振动的傅里叶频谱的特点是仅指冲击与暂态振动。而频率之比是无理数的两个简谐振

动组合的复合振动,频谱图仍然是离散的。

下面例举几种典型冲击函数频谱图。

矩形冲击信号,如图 1-5 (a)所示,它的数学表示式为

$$x(t) = \begin{cases} A & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t > \tau; t < 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

它的频谱函数 $X(f)$ 为

$$\begin{aligned} X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt = \int_0^{\tau} A e^{-j2\pi ft} dt \\ &= \frac{A}{2\pi f} [\sin 2\pi f\tau - j(1 - \cos 2\pi f\tau)] \end{aligned}$$

$$|X(f)| = \frac{A}{\pi f} |\sin \pi f\tau| \quad (1-8)$$

后锯齿冲击信号,如图 1-5 (b)所示,它的数学表示式为

$$x(t) = \begin{cases} \frac{A}{\tau} t & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t < 0; t > \tau \end{cases} \quad (1-9)$$

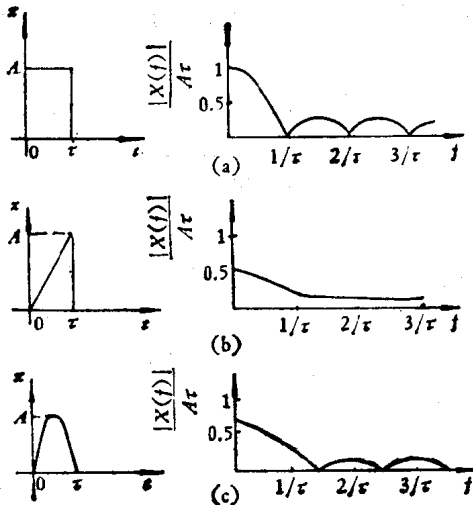


图 1-5