船体振动学

金咸定 主编

上海交通大学出版社

船体振动学

金咸定　主编

上海交通大学出版社

内容提要

本书内容分为两大部分。前面四章介绍结构振动的基本理论和常用的分析方法，讨论了单自由度系统、多自由度和分布参数系统的微幅振动，介绍了理论的若干应用——测振、隔振和消振，并对有限元法进行振动分析作了概要的阐述；后面三章介绍船体总振动的特点和计算方法，局部振动的计算方法，引起船舶振动的原因以及防振、测振和减振措施。

本书可作高等院校船舶设计和制造专业的教材和教学参考书，也可供从事船舶和其他工程结构振动的技术人员参考。

船体振动学

上海交通大学出版社出版

（淮海中路1984弄19号）

新华书店上海发行所发行

上虞汤浦印刷厂排版

常熟市印刷二厂印装

开本850×1168毫米 1/32　印张11.875　字数284000

1987年12月第1版　1988年1月第1次印刷

印数：1—1650

ISBN7—313—00079—0/O32　科技书目：163—288

定价：2.30元

前　言

本书是在1980年国防工业出版社出版的《船体振动学》(陆鑫森,金咸定、刘涌康编)一书的基础上改编的。八年来的教学实践和近年来船舶振动科学技术的发展是本教材改编的依据。

近若干年来，船舶振动问题已日益引起造船部门的关注和国内外众多学者和专家的兴趣，因而在理论和实验的研究方面有了迅速的发展。鉴于船舶振动的复杂性,对它的研究正更多地向多学科的交叉、多因素的综合和纵深发展,并更多地向预防和控制的要求发展，这就要求造船科技人员掌握更全面和更现代化的知识和手段。在当今信息时代,如何在有限的学时和篇幅里恰当地阐述基本理论和方法，而又能对日新月异的新技术和新思想予以必要的和适度的反映是编者企图尝试解决的问题。

根据历年来教学的实践和经验，学生在理解单自由度系统振动理论上并无太大困难,关键在于动手解题能力的培养,因而在本书中,加强了取分离体的内容;而在分析中较多地采用复数方法,使学生不致于有过多的重复感,且又较易和现代振动分析方法相衔接;在多自由度系统的分析中采用了循序渐进的方法,尽可能先从具体问题着手，再逐步过渡到直接用矩阵表示的途径，使学生能一开始将注意的重点放在对多自由度的固有振型、固有频率、主坐标和主振动的概念和方法的理解上。

本书除了对基本理论和方法进行阐述外,对原书中的“机械阻抗、数值计算”一节作了较大的删节,但保留了弹性结构的有限元分析法的基本原理。此外,还增加了传递函数的概念;突出和增加了阻尼及其对振动响应的影响计算的理论和方法;对任意激励的响应分析则贯穿于全书。

原书列“船舶噪声及其控制”一章，由于该问题的迅速发展和相对独立性，故不再收入本书。此外，增加了“船体振动的有限元分析模型”一节；介绍了船舶振动预防流程；鉴于螺旋桨和主机激振力问题的复杂性以及相应专门课程和学科的设立，对上述有关内容作了适当筛选和调整，增加了“船舶局部振动”一章。这种内容调整的目的是为了使学生对船舶（而不仅仅是船体）振动的各方面有较完整和统一的认识。至于一些更深入的问题，如流体和结构的耦合振动分析、动态子结构和模态综合法等，也未收入本书。书中还注意到国内外船舶振动的近期研究成果的综合反映以及实用性的要求。

全书按内容可分两大部分：前四章为振动理论部分，后三章为船体振动部分。授课时数为30～40左右，若取低限者可将目录及书中带*的部分删去不讲或作略述，但可供学有余力和有兴趣者选读。

本书编写分工如下：第一、二两章由赵玉华编写；第三章由马继成编写初稿，并由金咸定修改和定稿；其余各章由金咸定编写。全书编写工作由金咸定主持。

陆鑫森教授对本书的编写给予了热情的支持和帮助，对编写工作提出了许多宝贵的意见，并对书稿进行了审校，所提的意见和建议充实并精练了本书的内容，在此谨表谢意。

限于编者的水平和经验，本书难免会有种种缺点，恳请读者不吝指正，以期使本书能得到不断的完善和改进。

编　者　　于上海交通大学

1987年3月

目 录

第一章　振动的运动学概念

1.1 引　　言

在工程技术领域中，振动是极为普遍的现象。在振动过程中，系统将围绕平衡位置作往覆运动。从运动学观点来看，振动系统的某些物理量x（如位移，速度和加速度）在某个数值附近随着时间t而变化。如这种变化关系是确定的，则可以用函数关系描述其运动：

$$x = x(t)。 \tag{1.1}$$

如以t为横坐标，x为纵坐标，可作出振动过程中物理量x随时间的变化图形，即为时间历程图。

图1.1(a)、(b)表示在相等的时间间隔内的往覆运动，称为周期性振动。往覆一次所需的时间间隔T称为周期，单位一般以秒计。每经过一个周期后，运动便重复前一个周期中的全部过程。周期振动可以用时间的周期性函数表达为

$$x(t) = x(t + nT),\ n = 1,2,\cdots。 \tag{1.2}$$

图中(a)是周期振动中最简单的一种，称作简谐振动。任何周期振动都可以看作一系列简谐振动分量叠加的结果，但是，因为任意两个分量的频率比都是有理数，因而，合成振动具有周期性。

如果一系列简谐分量中，有一个分量与另一个分量的频率比值是无理数，那么，合成的振动便是非周期性的，称为“准周期振动”，见图1.1(c)。

图1.1(d)表示系统受冲击后产生的振动，其时间函数为衰

减函数或脉冲函数，称作瞬态振动，这也是非周期性的振动。

上述的振动，不论是周期性振动或非周期性振动，都可以表达成式（1.1）的函数形式。在任一给定瞬时t，都可以得到确定的物理量x，因而，振动是可以确定和预测的，统称确定性振动。但是，还有另一类振动（称为随机振动），其物理量的瞬时值不能用确定的函数来描述，即在任一指定瞬时t，并不能预知振动的物理量的值，也就是说，这种振动的运动不是时间的确定函数，但却具有一定的统计规律性。本书对此不予讨论，可参见有关随机振动的专著。

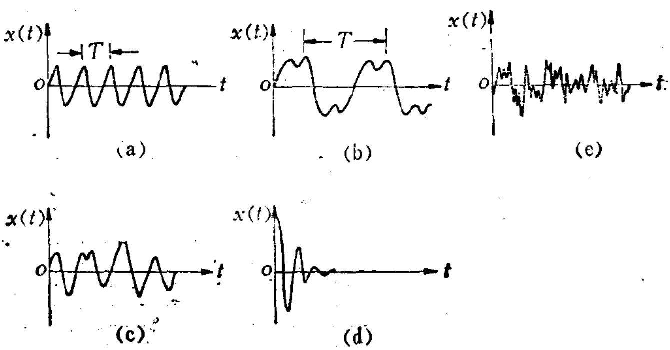

图 1.1 确定性振动与随机振动

(a) 简谐振动；(b) 周期振动；(c) 准周期振动；
(d) 瞬态振动；(e) 随机振动。

1.2 简谐振动

这是一种最常见和最简单的振动。可以用一个简单的实验来表演谐振动的特性。在弹簧上悬挂着一个质量块，在静止时给质量块以轻轻一击，质量块便在原来静平衡位置附近上下振动。如果在质量块上放一个小光源，使一束光线照射在一条匀速水

平移动的光敏纸带上，记录下质量块的运动过程，则这一运动过程即为简谐振动(如图 1.2 所示)，并可用下面正弦函数表达：

$$x = A\sin\frac{2\pi}{T}t。 \tag{1.3}$$

式中，T 为周期，A为离开静平衡位置的最远距离，称为振幅。

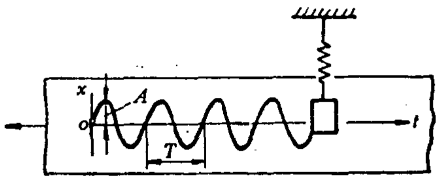

图 1.2 简谐运动过程

简谐运动还可以看作一个作等速圆周运动的点在铅垂轴上投影的结果，如图 1.3 所示。一长度为 A的直线 oP，由水平位置开始，以等角速度 ω 绕 o 点逆时针方向转动，任一瞬时 t，oP 在铅垂轴上的投影为

$$x = A\sin\omega t。 \tag{1.4}$$

式中，ω 的单位是 rad/s，称圆频率。ωt 称为相位，表示 oP 在时间 t 的转角。

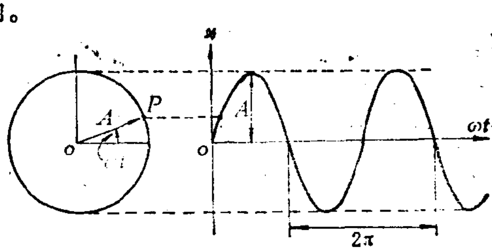

图 1.3 简谐运动的投影图

因为 oP 转过 2π 即一个周期后运动重复，上式应满足条件：$A\sin\omega(t+T) = A\sin(\omega t+2\pi)$，即 $\omega T = 2\pi$ 或 $\omega = \frac{2\pi}{T}$。代

入式(1.4)就可得到式(1.3)同样的结果，所以我们通常就以式(1.4)表示简谐振动。

在周期振动中，周期的倒数定义为频率：

$$f=\frac{1}{T}。\tag{1.5}$$

单位为 s^{-1}，或 Hz，即每秒钟振动的次数。它和 ω 的关系显然有

$$\omega=2\pi f。\tag{1.6}$$

如果图 1.2 所示的振动，在开始时质量块不在静平衡位置，则其位移表达式将具有一般形式：

$$x=A\sin(\omega t+\beta)。\tag{1.7}$$

式中，β 称为初相位，表示质量块的初始位置。

将位移表达式(1.7)对时间 t 求一阶或二阶导数可分别得到简谐振动的速度和加速度：

$$v=\dot{x}=A\omega\cos(\omega t+\beta))=A\omega\sin\left(\omega t+\beta+\frac{\pi}{2}\right),\tag{1.8}$$

$$a=\ddot{x}=-A\omega^2\sin(\omega t+\beta)=A\omega^2\sin(\omega t+\beta+\pi)。\tag{1.9}$$

可见，只要位移是简谐函数，速度和加速度也是简谐函数，而且与位移具有相同的频率。但是，速度的相位比位移的相位超前 $\frac{\pi}{2}$，加速度比位移超前 π，如图 1.4 所示。

由式(1.9)和(1.7)可以看出

$$\ddot{x}=-\omega^2 x,\tag{1.10}$$

这说明在简谐运动中，加速度的大小和位移成正比，而其方向和位移相反，即始终指向平衡位置。这是简谐振动的一个重要特征。

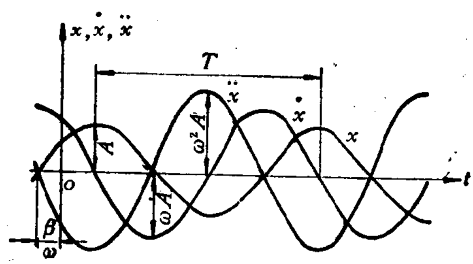

图 1.4　简谐振动随时间变化的规律

1.3 简谐振动的矢量与复数表示

如果将图 1.3 中 oP 看作模为 A 的矢量，那么，该矢量以等角速度 ω 从水平位置开始逆时针方向旋转时，任一瞬间它在铅垂轴上的投影便为简谐振动。这说明任一简谐振动都可以用一个旋转矢量的投影来表示。旋转矢量的模就是简谐振动的振幅，而旋转角速度即为简谐振动的圆频率。

根据复数的矢量表示法，如果将 oP 置于复平面内，并作上述旋转运动，矢量 A 就成为一复数旋转矢量，用复平面上的一个复数 Z 表示(见图1.5)，其表达式为

$$Z = A\cos\omega t + iA\sin\omega t = Ae^{i\omega t} \tag{1.11}$$

式中，$i = \sqrt{-1}$。

可以看出，复数 Z 在实轴(x 轴)和虚轴(y 轴)上的投影，即 Z 的实部和虚部均可表示一个简谐运动：

$$x = \mathrm{Re}Z = A\cos\omega t, \tag{1.12}$$

$$y = \mathrm{Im}Z = A\sin\omega t。 \tag{1.13}$$

式中，Re 表示实部，Im 表示虚部。

实际的振动物理量是实数，因此，如将它表示成复数，在进行复数运算后所得之复数解最终还得化为实数的结果。这是不

难做到的，因为含有复数的方程式意味着其实部和虚部均满足此方程式。所以只要约定采用复数的实部或虚部即可用复数形式运算或求解。

如果约定用实数部分表示简谐振动，即取

$$x = A\cos\omega t, \tag{1.14}$$

因为复数表示的位移为

$$Z = Ae^{i\omega t}, \tag{1.15}$$

相应地用复数表示的速度和加速度分别为

$$\dot{Z} = i\omega Ae^{i\omega t}, \tag{1.16}$$

$$\ddot{Z} = -\omega^2 Ae^{i\omega t}, \tag{1.17}$$

这样，简谐振动 x 的速度 $\dot{x}$ 和加速度 $\ddot{x}$ 可以从 $\dot{Z}$ 和 $\ddot{Z}$ 的实部取得，即有

$$\dot{x} = \mathrm{Re}\dot{Z} = -\omega A\sin\omega t = \omega\cos(\omega t + \pi/2), \tag{1.18}$$

$$\ddot{x} = \mathrm{Re}\ddot{Z} = -\omega^2 A\cos\omega t = \omega^2 A\cos(\omega t + \pi)。 \tag{1.19}$$

速度的幅值是位移的幅值的 ω 倍，相位超前 $90°$，加速度幅值是位移幅值的 ω^2 倍，相位超前 $180°$。这在复平面上可以看得很清楚。由于

$$i = e^{i\frac{\pi}{2}}, \tag{1.20}$$

式(1.16)和式(1.17)可化为

$$\dot{Z} = \omega Ae^{i(\omega t \pm \pi/2)}, \tag{1.21}$$

$$\ddot{Z} = \omega^2 Ae^{i(\omega t \pm \pi)}。 \tag{1.22}$$

$\dot{Z}$ 和 $\ddot{Z}$ 在复平面上各为一旋转矢量（图1.5）。它们在实轴上的投影分别为 $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$。

用复数表示法考察两个频率相同但幅值和相角不同的简谐振动的合成振动。设

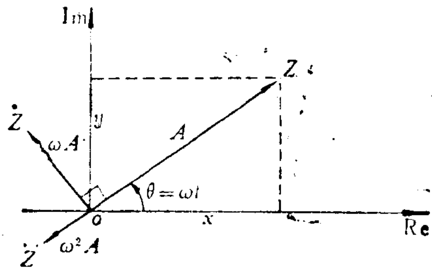

图 1.5　复平面上的振动位移、速度和加速度旋转矢量及其相互之间的关系

$$x_1 = A_1\cos\omega t = \mathrm{Re}A_1 e^{i\omega t}, \tag{1.23}$$

$$x_2 = A_2\cos(\omega t+\beta) = \mathrm{Re}A_2 e^{i(\omega t+\beta)}, \tag{1.24}$$

则

$$x_1 + x_2 = \mathrm{Re}(A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{i(\omega t+\beta)})。 \tag{1.25}$$

由于

$$A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{i(\omega t+\beta)} = e^{i\omega t}(A_1 + A_2 e^{i\beta}), \tag{1.26}$$

而

$$A_1 + A_2 e^{i\beta} = (A_1 + A_2\cos\beta) + iA_2\sin\beta = Ae^{i\theta}。 \tag{1.27}$$

式中

$$A = \sqrt{(A_1 + A_2\cos\beta)^2 + (A_2\sin\beta)^2}, \tag{1.28}$$

$$\theta = \mathrm{arctg}\frac{A_2\sin\beta}{A_1 + A_2\cos\beta}, \tag{1.29}$$

故

$$x_1 + x_2 = \mathrm{Re}Ae^{i(\omega t+\theta)} = A\cos(\omega t+\theta)。 \tag{1.30}$$

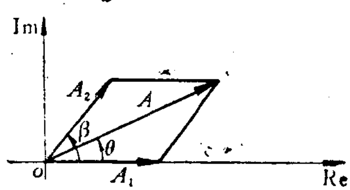

图 1.6　同频率振动的合成(复数表示法)

合成振动的振幅 A 以及它与原来的两个简谐振动的相位差在复平面上可用两个矢量之和得到（见图 1.6）。图上相角 β 和 θ 与时间 t 无关。三个矢量的角速度 ω 相同，当它们绕 o 点旋转时，矢量合成的平行四边形图形保持不变。

1.4 不同频率和幅值的简谐振动的合成

在结构系统的振动响应中，振动往往由许多幅值与频率均不相同的简谐振动组合而成。让我们观察两个幅值和频率都不同的简谐振动的合成(见图 1.7)。A_1、A_2 是两个角速度为 ω_1 和 ω_2 的旋转矢量，为了方便起见角 $\omega_1 t$ 从垂直轴量起。矢量在任一瞬时在垂直轴上的投影给出了振动的时间历程。$t=0$ 时这两个矢量之间的初相角为 ϕ，两个矢量在垂直轴上的投影之和给出了合成矢量在垂直轴上的投影，矢量 A_1、A_2 和它们在 t 时的合成矢量 A 也表于图 1.7上。该合成的振动运动可写为

$$x = A_1\cos\omega_1 t + A_2\cos(\omega_2 t+\phi)。\qquad (1.31)$$

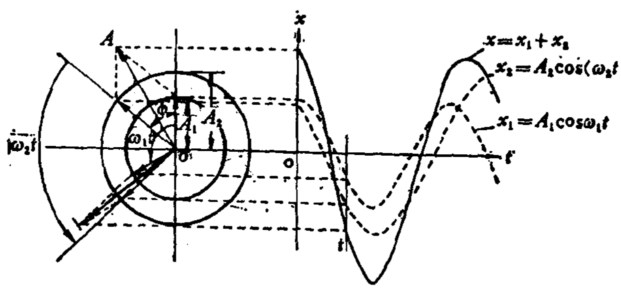

图 1.7　两个不同频率与振幅的简谐振动和它们的合成

设频率比为

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{m}{n}, \qquad (1.32)$$

此处 m 和 n 是整数，并取其最小值，则矢量 A_1 和 A_2 分别旋转

了 m 周和 n 周后，振动运动重复，其合成振动的周期为T，则

$$\left.\begin{aligned}\omega_1 T = 2\pi m\\ \omega_2 T = 2\pi n\end{aligned}\right\}, \tag{1.33}$$

经过周期 T 后，其重复的振动可写为

$$x = A_1\cos(\omega_1 t + \omega_1 T) + A_2\cos(\omega_2 t + \omega_2 T + \phi)。\tag{1.34}$$

因而合成振动的频率 $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$，可由式(1.33)得

$$\omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{m - n}。\tag{1.35}$$

图 1.8 表示两个简谐振动以及其合成振动的时间历程。

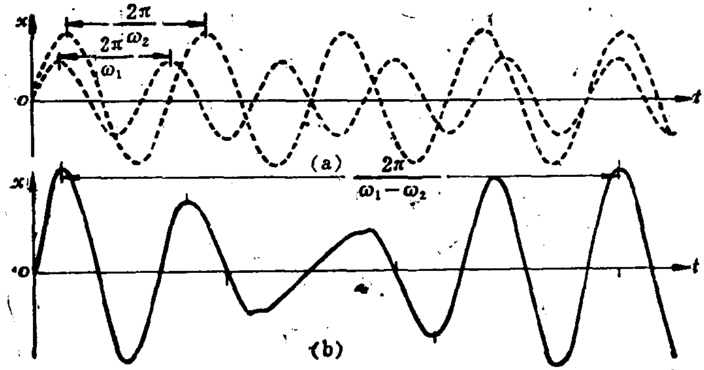

图 1.8 两个振幅和频率不同的简谐振动及其合成振动的时间历程

(a) 两个简谐振动的时间历程；(b) 合成振动的时间历程

当 ω_1 与 ω_2 非常接近且其幅值亦相等时，其合成振动为一特例，这种现象叫“拍”。有关“拍”的知识我们将在共振一节中详细介绍。

1.5 谐 波 分 析

工程实际中有许多非简谐的周期性振动，通常，可以通过谐