高等学校教材

自动武器振动基础

李德芬　过永德　编

兵器工业出版社

自动武器振动基础

李德芬
过永德 编

内 容 简 介

《自动武器振动基础》是根据高等工科院校自动武器专业的教学要求编写的。全书共分六章，包括单自由度系统，两自由度系统，多自由度系统和弹性系统的振动分析。

本书供高等工科院校自动武器专业本科生作为振动理论基础课程的教材或参考书，对于自动武器专业从事振动研究、动力分析和强度研究的科技人员，以及普通机械专业从事振动的研究人员也有参考价值。

自动武器振动基础

李德芬 过永德 编

[illegible] 出版

（北京市海淀区车道沟10号）

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

五三一印刷厂印装

开本：787×1092 1/32 印张：8.25 字数：179.01千字

1991年3月第1版 1991年3月第1次印刷

印数：1～1000 定价：2.12元

ISBN 7-80038-254-0/TJ·28（课）

出版说明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而光荣的任务。由于各兵工院校、特别是参与编审工作的广大教师积极支持和努力，及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自1985年到1988年共编审出版了89种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版工作的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位责任，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程的科学管理。

1985年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材176种。这批教材主要是从经过两遍教学使用、反映较好的讲义中遴选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度地更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由周亚明主审，经机械电子工业部枪炮专业教学指导委员会复查，兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室

1989年8月

前 言

现代科学技术的发展中，振动分析在军工、机械、船舶、土建、电子和宇航等工业方面都占有重要的地位。随着国防工业的现代化，对自动武器的要求也愈来愈高，特别是要求武器在重量尽可能轻的前提下，仍保持有较高的射击精度。然而，射击时武器零、部件所产生的振动，如枪管、机匣、枪架和枪身等的振动，都大大影响到武器的射击精度和使用寿命。要研究这些因素所造成的影响，必须用振动理论作指导。另外，自动武器中有许多零、部件是在弹簧作用下运动的，因而构成了许多弹簧质量振动系统，例如，武器的核心部件——自动机，就是在复进簧作用下运动的。对这些系统进行深入的运动和动力分析时，也要用到振动理论。总之，振动理论方面的知识是武器研究和设计的技术人员必不可少的知识。现在，高等院校的火炮和自动武器专业已将振动基础列为必修（或选修）课。

本书较系统地介绍了研究武器振动问题所需要的基础理论。其中的主要内容是根据自动武器结构需要而选取的。如本书根据枪管、枪架等结构着重介绍杆，轴和梁的振动。书中的一些基本理论对于一般机械也是完全适用的，编写时注意了这方面的需要。

第一章简要地介绍了振动运动学的基本概念。讨论了简谐振动的性质，介绍了各种表示法；对非简谐周期振动和非周期一般振动进行了谱分析；最后介绍了振动系统的各组成部分。

第二和第三章详细地讨论了单自由度系统的自由振动和

强迫振动。这是由于单自由度系统是最简单的一种系统，对它的分析可得到系统振动的主要特性，并建立起一系列的基本概念。这是振动理论最基本的部分，也是研究振动问题的理论基础，必须深入掌握，因而介绍时举了大量的应用实例。

第四章研究了两自由度系统的振动。它是最简单的多自由度系统，两自由度和多自由度系统之间没有质的不同，因而，通过本章的研究建立了一系列多自由度系统的基本概念。

第五章讨论了多自由度系统的振动。着重介绍了用模态分析法求解系统动力响应的基本理论和计算公式。

第六章研究了弹性体的振动。着重讨论了弦、杆、梁等连续系统响应问题的精确解。通过讨论，建立了弹性体振动的基本概念和分析方法。

全书各章均有例题和习题。

振动理论的内容很丰富，很多理论现已相当成熟，应用也很广泛。本书由于篇幅的限制，只能介绍线性振动方面的基本理论，而不涉及更为深入的内容。

本书的第一、四、五章由李德芬编写，第二、三、六章由过永德编写，全书最后由李德芬统稿。限于编者的水平和能力，书中缺点和错误在所难免，希望读者给予指正。

编者

1989年10月

目　录

第一章 导　论

第一节　振动的分类

随着现代科学技术的发展，振动问题在机械设计、船舶设计、土建设计和飞机设计等各方面的地位愈来愈重要。自动武器是一种典型的自动机械，它是通过急剧膨胀的高压火药燃气推动弹头，使弹头有效而准确地杀伤和破坏目标。在发射弹头的过程中，影响弹头密集度的因素尽管很多，但由各种激励引起的枪口振动无疑是个重要的因素。在射击过程中，各时期的激励类型很多，如火药燃气的作用、自动机对机匣的各种撞击等等，都会使武器产生振动，引起枪口处角速度和线位移等的变化，从而导致单发或连发射击精度的降低。又由于结构产生交变应力，导致武器零、部件的疲劳破坏。要解决这些由于系统振动而带来的问题，必须有振动理论作指导。

自动武器的振动，属于机械系统的振动问题。所谓机械系统（简称系统）是指由一些具有力学特性的元件组成的组合体，它可以完成某种特定的动作。组成系统的元件有弹性元件、惯性元件和阻尼元件等。振动问题所涉及的内容可以用以下框图简要表述

$\xrightarrow[\text{激励}]{\text{输入}}$ $\boxed{\text{系　统}}$ $\xrightarrow[\text{响应}]{\text{输出}}$

系统的输入，一般包括初始干扰、外激励力等，统称为激励。系统的输出，通常称为系统的动态响应，简称响应。振动分析就是研究系统在各种激励下产生响应的变化规律。

振动分析的一个首要问题是建立系统的数学模型。为建立数学模型，首先要将所研究的系统抽象化，忽略次要因素，突出主要力学性能，并分析相应的各元件以及它们的组合关系，最后应用力学原理写出描述系统力学特性的数学方程。建立数学模型是决定振动分析的可行性、正确性、精确度和繁简程度的关键步骤。

根据机械振动的不同特征可作不同的分类。

一、按系统结构参数的特性分类

线性振动——用常系数线性微分方程描述的系统振动。它的惯性力、阻尼力和弹性力分别与加速度、速度及位移成正比。

非线性振动——用非线性微分方程描述的系统振动。

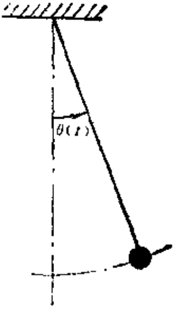

图1-1 单 摆

线性系统与非线性系统之间的区分，往往决定于运算的范围，而不是系统的固有性质。例如单摆（图1-1），用偏离铅垂位置的摆幅θ来描述其运动形态，其恢复力矩与$\sin\theta$成正比。对于大的摆幅，$\sin\theta$为θ的非线性函数；对于小的摆幅，$\sin\theta$可近似地用θ表示。因而，同一个摆，在摆幅较小时，可以视为线性系统，而在摆幅较大时，则为非线性系统。

线性振动和非线性振动各自发展了相应的理论和处理问题的数学方法。本

教程主要介绍线性振动理论。因此只限于研究微幅振动问题。实际系统越近于小位移或微振动，所用理论就越精确。

二、按系统的数学模型分类

单自由度系统振动——用一个独立坐标就能确定的系统振动，例如单摆。

多自由度系统振动——用多个独立坐标才能确定的系统振动。例如图1-2所示车床上的被加工零件，需用θ和y两个广义坐标描述它的运动形态。

图1-2　车床工件振动系统

连续弹性体振动——须用无限多个独立坐标才能确定的系统振动，也称为无限多自由度系统振动。

实际结构，也就是实际物理系统，往往是由连续弹性体组成的。这些系统的物理属性或特征（统称为参数）是均匀或非均匀分布的，因此又称为分布参数系统，或连续系统。通常要用偏微分方程来描述。由于连续系统的复杂性，对它们的振动分析是困难的，有的甚至是不可能的。因此，需要对系统作进一步简化。在许多情况下，可以用系统的离散参数（单个或多个）代替系统的分布参数。也就是说，将系统的无限多个自由度数降低成为有限多个自由度数，使问题的分析简化。后一种类型为离散参数系统，或集总系统。通常用常微分方程来描述它。虽然在离散系统和分布系统的处理上存在着明显的差异，但是，当用这两个数学模型描述同一个一般的物理系统时，它们之间存在着一定的内在联系。因

此，差异是表面性的，而不是实质性的。

三、按系统的激励变化规律分类

自由振动——系统受初始干扰或原有的外激励或约束去掉后产生的振动。

强迫振动——系统在外激励作用下产生的振动。

自激振动——在输入和输出之间具有反馈特性，并有能源补充的系统所产生的振动。

四、按系统的响应变化规律分类

简谐振动——振动量为时间的正弦或余弦函数。

周期振动——振动量为时间的周期函数。可用谐波分析的方法将周期振动分解为一系列简谐振动。

瞬态振动——振动量为时间的非周期函数。通常只在一定时间内存在。

随机振动——振动量不是时间的确定性函数，因而不能预测，只能用概率统计的方法进行研究。

如上所述，前三种振动的时间历程可以用确定的时间函数来描述，因而每一时刻的运动量是预知的确定值，故又可称为确定性振动。本教程主要讨论此类振动。

五、按系统在振动时的位移特征分类

扭转振动——振动物体上的质点只作绕轴线旋转的振动。

纵向振动——振动物体上的质点只作沿轴线方向的振动。

横向振动——振动物体上的质点只作垂直于轴线方向的振动。

本书将以线性系统为对象，以系统数学模型的分类形式为基础，按离散系统和连续系统的顺序逐一进行讨论。

第二节　简谐振动及其表示法

周期性振动中最简单的是简谐振动。我们可以用一个简单的实验来演示简谐振动的特性。在一根无质量的弹簧（即不计弹簧的质量）上悬挂一个具有一定质量的重块，组成了一个单自由度的质量-弹簧系统，如图1-3所示。在重块静止时给以轻轻一击，重块便在其静平衡位置上下振动。若在重块上放一小光源，使它的一束光照射在一条匀速水平移动的光敏纸带上，记录其运动量随时间的变化规律，一般称为时间历程。系统位移的时间历程是时间t的正弦函数

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

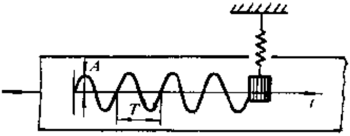

图1-3　单自由度系统的运动

这种振动称为简谐振动。描述简谐振动除了用三角函数外，还可用旋转矢量，复数等。下面分别介绍简谐振动的各种表示法，及由此得出的一些特性。

一、简谐振动的三角函数表示法

简谐振动还可以看作是一个作等速圆周运动的点在铅垂轴上投影的结果。如图1-4，一长度为A的线段OP，由水平位置开始，以等角速度ω绕O点转动，任一瞬间t，OP在铅垂轴上的投影为

$$x = A\sin\omega t \qquad (1\text{-}1)$$

式中　A——振幅（m）；

ωt——相位，表示OP在时间t的转角（rad）；

ω——转动角速度（rad/s）。

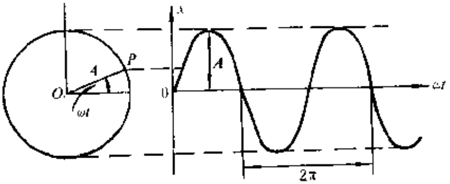

图1-4　简谐振动的周期性

简谐振动是一种最简单的周期运动。经过一定的时间间隔T，系统将重复它的运动过程，这种性质称为周期性，时间间隔T称为周期，单位为s。当线段OP转过2π弧度时即为一个周期，因而上式应满足条件

$$A\sin\omega(t+T)=A\sin(\omega t+2\pi)$$

$$\omega T=2\pi$$

或
$$\omega=\frac{2\pi}{T}$$

在周期振动中，周期的倒数定义为频率

$$f=\frac{1}{T} \tag{1-2}$$

它表示了系统在单位时间内作重复运动的次数，单位为Hz。

与频率相同的另一个概念是圆频率

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f \quad (\mathrm{rad/s}) \tag{1-3}$$

这是频率的2π倍，两者表示的是同一个物理量。在本书后面的内容中，我们将不加区别地统称为频率，仅在使用的符号及相应的单位上加以区分。

如果图1-3所示的振动，开始时重块不在静平衡位置，

则其表达式将具有一般形式

$$x=A\sin(\omega t+\varphi) \tag{1-4}$$

式中 φ——初相位，表示重块的初始位置，单位是rad。

综上分析，完整地描述一个简谐振动必备三个要素，即频率（或周期）、振幅和初相位。

只要对（1-4）式求导数，即可得到简谐振动的速度和加速度

$$v=\dot{x}=A\omega\cos(\omega t+\varphi)=A\omega\sin(\omega t+\varphi+\pi/2)$$

$$a=\ddot{x}=-A\omega^2\sin(\omega t+\varphi)=A\omega^2\sin(\omega t+\varphi+\pi)$$

由此可见，只要位移是简谐函数，速度和加速度也是简谐函数，且都与位移具有相同的频率ω，只是速度的振幅是$A\omega$，是位移振幅的ω倍，加速度的振幅是$A\omega^2$，是位移振幅的ω^2倍。速度的相位始终比位移的相位超前$\pi/2$，加速度的相位则超前π，即方向与位移相反。位移、速度、加速度的幅值和相位之间在任一瞬时都有固定的关系，如图1-5所示。这些构成了简谐振动的重要特性。

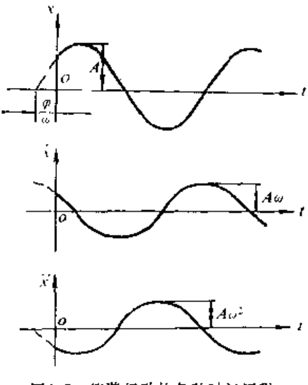

图1-5 简谐振动的各种时间历程

二、简谐振动的旋转矢量表示法

简谐振动也可以用旋转矢量来表示。图1-6表示一模为A的矢量OP，以等角速度ω逆时针旋转。OP即称为旋转矢量。

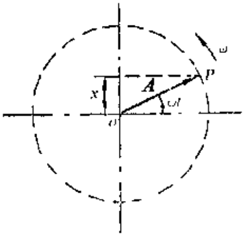

图1-6　旋转矢量表示法

据前知，它任一瞬间在铅垂轴上的投影用正弦函数（见式1-1）表示，是一简谐振动。同理，它在水平轴上的投影为一余弦函数，也是一简谐振动。从而说明，任一简谐振动都可用一旋转矢量的投影来表示。这个旋转矢量的模就是简谐振动的振幅，它的旋转角速度就是简谐振动的圆频率。

在振动分析中，常会遇到这样的问题：已知两个同频率的简谐振动，设

$$x_1 = a \quad \cos\omega t$$

$$x_2 = b \quad \sin\omega t$$

它们的合成振动为

$$x = x_1 + x_2 = a\cos\omega t + b\sin\omega t$$

若采用三角函数表示法来分析，运算较为烦琐。若采用旋转矢量表示法，则显得容易多了。首先将上式改写为

$$x = a\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + b\sin\omega t$$

由于它们是同频率，即用同样的角速度旋转的。因而，这两个旋转矢量 $\vec{a}$ 和 $\vec{b}$ 的相对位置不改变，它们的合成就可以采用矢量和的办法（见图1-7），由于已给出两个简谐振动的相位差是$\pi/2$，故其合成振动的振幅为

$$A^2 = a^2 + b^2 \tag{1-5}$$

同时，还可确定其初相位

$$\varphi = \tan^{-1}\frac{a}{b} \qquad (1\text{-}6)$$

合成的旋转矢量也是以角速度ω旋转的，可表示为

$$x = A\sin(\omega t + \varphi) \qquad (1\text{-}7)$$

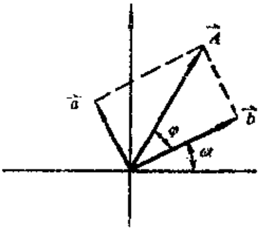

图1-7　同频率简谐振动的合成

简谐振动的速度和加速度也可用旋转矢量来表示。现将位移、速度和加速度旋转矢量综合画在图1-8(a)上。由于它们具有相同的频率，故它们的相对位置不变，它们的振幅分别是A、ωA、$\omega^2 A$，它们的相位是依次超前$\pi/2$，据旋转矢量图，不难得出其时间历程图，如图1-8(b)。

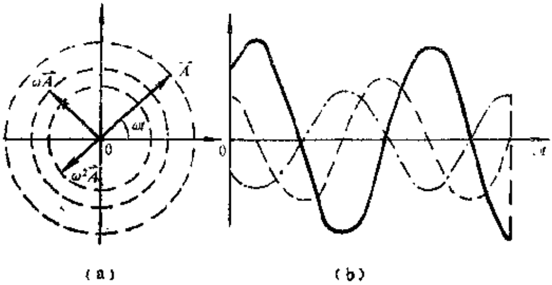

图1-8　位移、速度和加速度旋转矢量
(a)旋转矢量图；　　(b)时间历程图。

三、简谐振动的复数表示法

简谐振动更为一般的表示方法是复数表示法。在复平面上，复数Z代表在该复平面上的一个矢量，如图1-9(a)中