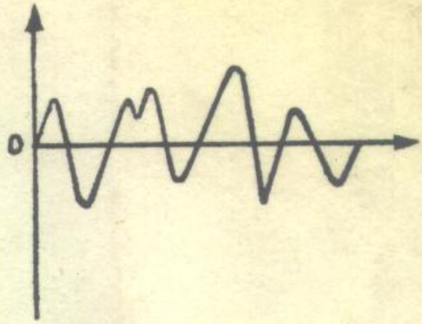
机械故障诊断丛书



$$x(t)=\sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(2\pi f_n t+\varphi_n)$$

故障诊断的振动理论基础

寇惠 付润兰 原培新 编

冶金工业出版社

机械故障诊断丛书

故障诊断的振动理论基础

寇惠 付润兰 原培新 编

冶金工业出版社

内 容 简 介

《故障诊断的振动理论基础》是根据振动诊断方法的需要来编写的。全书共分7章，主要讲述了如何将实际很复杂的机器简化成适合力学计算的模型问题，一、二及多自由度系统微分方程的建立及解法的问题，并重点介绍了适合计算机计算的矩阵方程的建立以及传递矩阵法求固有频率及振型问题。最后介绍了振动理论在往复及旋转机械中的应用，往复机械产生振动的原因及分析方法，旋转机械的临界转速问题等，还介绍了动平衡的概念及动平衡试验。书中选编了一些有实际意义的例题与习题，以便帮助读者消化和掌握有关振动理论与方法。

本书是机械故障诊断丛书之一。本丛书适合从事机械设计、维修以及进行现场振动监测的工程技术人员培训或自学之用。

机 械 故 障 诊 断 丛 书

故障诊断的振动理论基础

寇 惠 付润兰 原培新 编

*

冶金工业出版社出版发行

（北京北河沿大街嵩祝院北巷39号）

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 6 1/8 字数 158 千字

1989 年 9 月第一版 1989 年 9 月第一次印刷

印数00,001～7,000册

ISBN 7-5024-0448-1

TH·24 定价4.50元

前　　言

机械故障诊断技术涉及到的理论与方法很多，可用来诊断的信息也很广泛，如温度、声音、位移、速度、加速度、变形、应力、油液、铁谱等。而目前应用较多的是通过位移、速度、加速度等所获得的振动响应以及系统本身的动态特性(固有频率、振型等)进行诊断，即所谓的振动诊断。因为这种方法理论完整，可使用的设备较多，所以越来越受到重视。

本书作为广大工程技术人员进行继续学习的丛书之一，旨在帮助工程技术人员掌握振动诊断技术的理论基础。本书的内容是在总结几次学习班教学经验基础上选定的。在编写中力求内容简明、扼要、重点突出、理论联系实际，避免繁琐的公式推导，因此本书除作为40学时的教材外，还可作为具有大专以上文化程度的从事机械设备维修的工程技术人员自学用。

全书共分7章。寇惠为主编并负责编1、2、6、7章，付润兰负责编写第5章，原培新负责编写3、4章。由于编者水平所限，定有不足之处，望广大读者提出宝贵意见。

编　　者

1988.1

目　录

1 概　述

1.1 机械振动与振动诊断

各种机器设备是由许多零部件和各种各样的安装基础所组成，这些都可认为是一个弹性系统。某些条件或因素可能引起这些物体在其平衡位置附近做微小的往复运动，这种每隔一定时间的往复性机械运动，称为机械振动。

研究振动问题时，一般将研究对象(如一部机器、一种结构)称为系统；把外界对系统的作用或机器自身运动产生的力，称为激励或输入；把机器或结构在激励作用下产生的动态行为，称为响应或输出。振动分析（理论或实验分析）就是研究这三者间的相互关系。

所谓振动诊断，就是对正在运行的机械设备或给非工作状态的系统某种激励，测其振动响应，对由测量响应得到的各种数据进行分析处理，然后将结果与事先制订的某一标准进行比较。进而判断系统内部结构的破坏、裂纹、开焊、磨损、松脱及老化等各种影响系统正常运行的故障。依此采取相应的对策来消除故障。保证系统安全运行。振动诊断还包含对其环境的预测，即已知系统的输出及系统的参数（质量、刚度、阻尼等）来确定系统的输入，以判断系统环境的特性，如寻找振源等问题的研究。当前振动诊断已应用于各种系统，如备种往复机械系统，各种旋转机械系统，各种建筑结构及海上采油平台等。

1.2 工程中常见的振动问题

振动有其有利的方面，如各种振动机械的利用，但更多的是存在不利的方面。这方面的一些问题，简略分述如下。

1.2.1 机械中的振动问题

高速旋转的汽轮机、压缩机等旋转机械，由于旋转质量的不平衡、轴承的刚度、滚珠的缺陷、滑动轴承的油膜振荡等因素影响都会引起振动。即使是低速旋转的初轧机，在咬钢时受到冲击力作用或在轧制过程中发生打滑，也会引起轴系很大的扭转振动。

往复机械的活塞、联杆，由于受到脉动的气体压力在往复运动时就会产生惯性力与惯性力矩的作用，可使其产生往复振动和扭转振动。

齿轮和齿轮箱等各种零件，由于不均衡的传递力矩作用，安装上的误差，制造精度误差等，不但会引起这些零件的局部或整体振动，还会产生很大的噪声，危害人的身体健康。

由于振动，机器在使用中会产生巨大的反复变动的交变载荷，这不但会降低机器的使用寿命和可靠性，而且还会发生严重的破坏事故。如火车断轴会造成灾难性事故，轧钢机断轴、断辊会给生产造成很大的经济损失。

1.2.2 结构中的振动问题

厂房、各种建筑物、大型设备的基础、桥梁、水坝、海洋平台、高耸的铁塔等结构物，它们除了承受各种形式的静力载荷之外，还要受到各种动力载荷的作用。例如，机器运转的周期性载荷，爆炸和地震的瞬时作用载荷等等。有些载荷是突然作用于结构上，并使其产生较大的加速度和惯性力，因而引起结构物的各种振动。在动力载荷的作用下，即使在弹性限度内，结构的内力和变形除与载荷的强度有关外，还与载荷的变化方式、变化规律及结构的动力特性（固有频率等）有很大的关系。有时动力载荷的强度并不很大，但由于振动特性的影响却能使结构产生很大的内力和变形，或者是发生疲劳破坏。如飞机因颤振而坠落。拖拉机的水缸因振动而破裂，大桥因共振而毁坏(1940年美国Tacoma吊桥因风载引起共振而毁于一旦)。当然，动力载荷的强度很大时，会造成更大的破坏。如房屋因地震而倒塌的破坏。

1.2.3 机械加工过程中的振动问题

在进行机械加工时，切削和磨削都可能发生振动。尤其在高效、强力、成形切削和磨削加工中，常会产生较强烈的振动。当切削振动发生时，工件表面质量恶化，粗糙度下降，会产生明显的表面振痕。振动严重时会产生崩刃打刀现象，使加工无法进行。另一方面，振动加速了刀具或砂轮的磨损，同时会引起机床联结件的松动，影响轴承工作性能，使机床过早的丧失精度。

再有，随着工业和尖端科学技术的发展，又出现了很多难以加工的材料。又由于对加工精度和表面质量的要求越来越高，因此，切削加工中出现的极其微小的振动，也会使零件无法达到质量要求。

在连轧机上进行有张力的带材轧制生产时，由于轧辊的振动、张力波动等都会引起带材的振动，因而使带材尺寸产生较大的误差，造成薄厚不均，甚至产生废品。

综上所述，振动问题广泛地存在于各种机械、各种结构及各种机械加工过程中，故只有弄清产生这些振动的原因，掌握它们发生发展的规律，才能有效地控制和消除这些振动的影响。在研究和解决振动问题时，既需要进行理论上的分析计算，也需要进行直接的测量和试验。特别是电子计算机的应用，将理论计算与实验数据处理的速度和精度大大提高了，使得过去许多不能解决的振动问题，都有了解决的办法。如何尽快地掌握振动的分析方法，解决工程中的振动问题，已经提到广大工程技术人员的面前。

1.3 振动的分类

建立一个振动系统参数（质量、刚度、阻尼）、激励和响应三者间的关系式，称为描述振动系统的运动微分方程式、微分方程的解则表示振动体位移（速度或加速度）随时间的变化规律。一般称为时间历程曲线（简称时历曲线）。工程实际问题中，有一类振动系统可以用上述确定性的数学关系式来描述，有一类振动系统则不能用上述的确定性的数学关系式来描述。据此将振动分

为两大类。如图1-1所示。

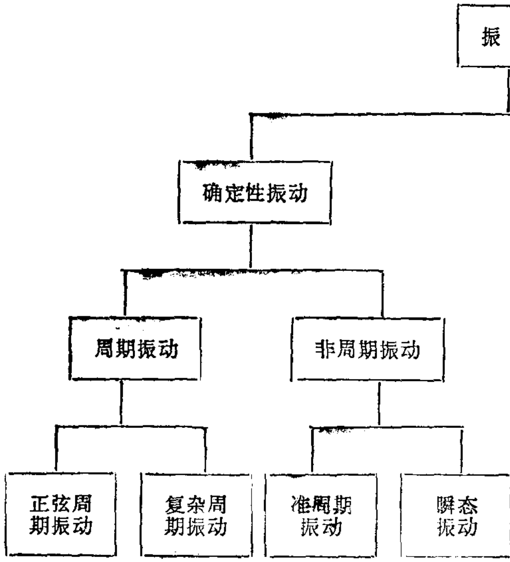


图 1-1　振动分类

1.3.1　确定性振动

确定性振动可分为周期振动和非周期振动两类。而周期振动又可分为简谐周期振动和复杂周期振动。非周期振动亦可分为准周期振动和瞬态振动。

1.3.1.1 简谐周期振动

简谐振动的位移时间历程是：

$$x(t)=A\sin(2\pi f_0 t+\varphi) \tag{1-1}$$

式中　$x(t)$——振动的位移；

A——位移的振幅值；

f_0——振动的频率；

φ——初相角。

式1-1所描述时间历程曲线如图1-2a所示。对此时历曲线观察可见，它的周期（往复一次的时间）$T=1/f_0$的重复性是非常

明显的。在A、f_0和φ一定时，对任意时刻t，振动位移$x(t)$的数值可以精确的计算出来，是一个确定性的数值，从频率成分看，它只含有一种频率，其频谱（振动的幅值或能量按频率的分布图）是由单一频率f_0上的振幅A构成。如图1-2b所示。这样的

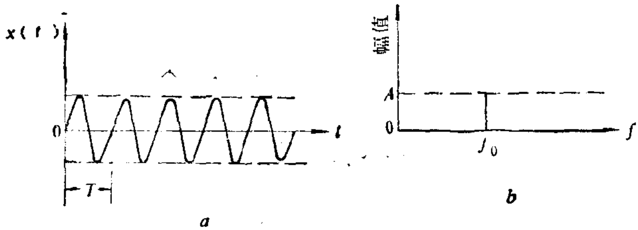


图 1-2　简谐振动的时历曲线及频谱图

谱称为离散谱或线谱。也就是说，简谐振动全部能量集中在单一频率上。在实践中，有很多物理现象会产生近似于简谐振动的运动。例如交流发电机的电压输出，不平衡旋转重物的振动运动等。

1.3.1.2　复杂周期振动

所谓复杂周期振动，就是指除简谐振动以外的周期振动。可以用周期性的时间变量函数来描述，即：

$$x(t)=x(t\pm nT),\quad n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots \tag{1-2}$$

式1-2所描述的时历曲线如图1-3a所示。由图可见，复杂周期振动$x(t)$的瞬时值，经过基本周期T的整数倍后将重复发生，与简谐振动一样，一个波需要的时间称为周期。单位时间内的循环数称为基频f_1。显然，简谐振动是复杂周期振动在$f_1=f_0$时的一个特例。

复杂周期振动，可按傅里叶级数展开而分解为简谐振动的叠加，即：

$$x(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos2\pi nf_1t+b_n\sin2\pi nf_1t) \tag{1-3}$$

式中　$f_1=\frac{1}{T}$;

$$a_n=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos 2\pi n f_1 t dt,\quad n=0,\ 1,\ 2,\ \cdots;$$

$$b_n=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin 2\pi n f_1 t dt,\quad n=0,\ 1,\ 2,\ \cdots$$

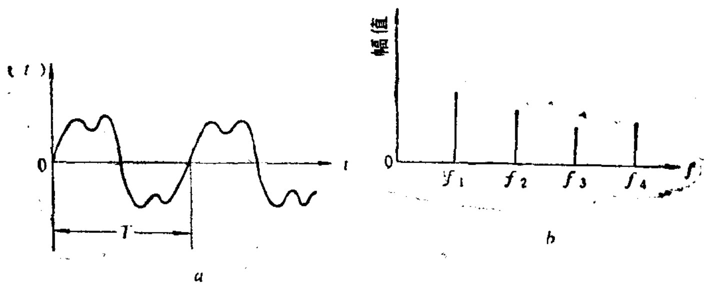


图 1-3　复杂周期振动时历曲线及频谱图

若将式1-3中相同频率的正弦函数与余弦函数相加，则该式变为：

$$x(t)=X_0+\sum_{n=1}^{\infty}X_n\cos(2\pi n f_1 t+\varphi_n)\qquad(1\text{-}4)$$

式中　$X_0=\frac{a_0}{2}$;

$$X_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2},\quad n=1,\ 2,\ 3\cdots;$$

$$\varphi_n=\tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right),\quad n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots$$

由式1-4可见，复杂周期振动是由一个静态分量X_0和无限个谐波余弦分量（振幅为X_n，相角为φ_n）组成。各谐波分量的频率都是f_1（基频）的整数倍。其频谱如图1-3*b*所示。

实践中产生复杂周期振动的情况远多于产生简谐振动的情

况。事实上，简谐振动往往是复杂周期振动的一种近似表示。如交流发电机的输出电压，经观察，它就具有一定的高频分量。多缸往复式发动机的振动响应，通常都具有明显的谐振分量。

1.3.1.3 准周期振动

所谓准周期振动，也是由一些不同频率的简谐振动合成的振动。这一点与复杂周期振动相类似。但是，准周期振动没有周期性，组成它的简谐分量中总会有一个分量与另一个分量的频率之比值为无理数。而复杂周期振动的诸简谐分量中任何两个分量的频率之比都是有理数。例如，$x(t)=X_1\sin(2t+\varphi_1)+X_2\sin(3t+\varphi_2)+X_3\sin(7t+\varphi_3)$ 是周期振动的，因为2/3、2/7、3/7是有理数。而2、3、7的最大公约数是1，所以这一周期振动的基本周期为$T=1$。又例如$x(t)=X_1\sin(2t+\varphi_1)+X_2\sin(3t+\varphi_2)+X_3\sin(\sqrt{50}t+\varphi_3)$，就不是周期振动了。因为，$2/\sqrt{50}$、$3/\sqrt{50}$不是有理数而是一无限不循环小数，不满足周期振动$x(t)=x(t\pm nT)$的关系，即找不到一个基本周期$T$，故为准周期振动。所以说准周期振动是一种非周期振动，可用如下的函数描述之：

$$x(t)=\sum_{n=1}^{\infty}X_n\sin(2\pi f_nt+\varphi_n) \tag{1-5}$$

式1-5中，f_n/f_m在任何情况下都不等于有理数（即每一正弦函数的周期都不是基本周期的整数倍）。准周期振动的时历曲线及频谱如图1-4所示。准周期振动的频谱仍为线谱，只是线谱间

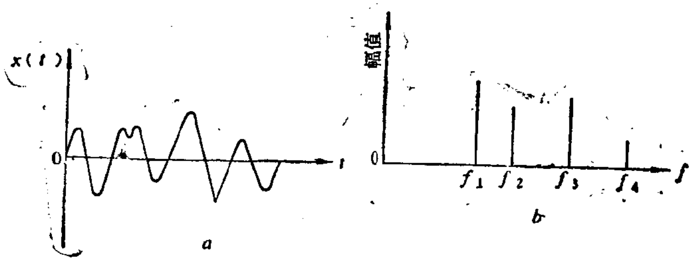


图 1-4 准周期振动时历曲线及频谱图

隔不是等距分布的。在实践中，有两个或几个无关联的周期性现象混合作用时，会出现准周期振动。多机组螺旋推进飞机，发动机不同步时的振动响应就是一例。

1.3.1.4 瞬态振动

除了准周期以外的非周期振动都属于瞬态振动，换句话说，瞬态振动包括前面一切没有讨论过的，可以用各种脉冲函数或衰减函数描述的振动。图1-5给出了瞬态振动的简单例子。其数学关系式为：

$$x(t)=\begin{cases}Ae^{-at}\cos bt & (t\geqslant 0)\\ 0 & (t<0)\end{cases}$$

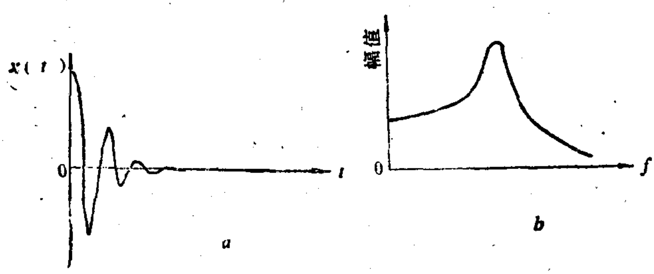


图 1-5 瞬态振动的时历曲线及频谱图

瞬态振动与周期和准周期振动不同的一个重要特征，就是频谱不是离散谱而是一个连续谱。如图1-5b所示。

1.3.2 随机振动

随机振动是一种非确定性振动，不能用精确的数学关系式描述，因为这种现象每次观察都是不一样的。例如研究结构抗震问题时，就不能用一个确定函数来描述可能要发生的地震的振动波形，也就是对振动系统的激励事先不能用确定性函数来描述。因此振动响应也就不能用确定性函数来描述。随机振动的时历曲线如图1-6所示。

随机振动虽然具有不确定性，但确有一定统计规律性。所谓统计规律性，就是在一定条件下多次重复某项实验或观察某种现

象所得结果呈现出的规律性。关于随机振动的统计特征，将在《故障诊断的振动信号处理》一书中介绍，这里不再赘述。在工

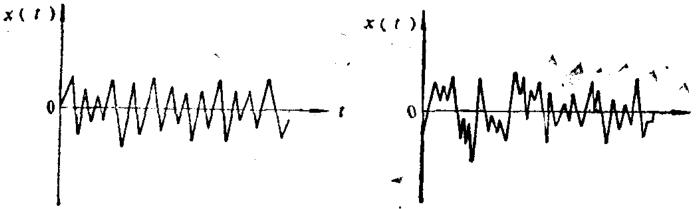


图 1-6 随机振动时历曲线

程实际中，一种振动是属于确定性的振动还是属于随机振动是很难区分的。因为确定性振动中也难免有意外因素的影响，使得振动有一定的随机性。从这个意义上说，绝对的确定性的振动是不存在的。若判断振动属于那一类，通常是以在相同的条件下是否产生相同的振动结果作为依据。如果在相同的条件下多次重复同一实验，所得振动结果相同，则认为该振动是确定性的振动。否则为随机振动。虽然如此，很多实际问题都可应用确定性振动理论来研究。所以本书主要介绍确定性振动的基本理论及分析方法。