

庄表中 黄志强 编著

振动分析基础

科学出版社

032
696Z

振动分析基础

庄表中 黄志强 编著

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书简要地叙述了自由振动、受迫振动、自激振动与参变振动、随机振动的特征和规律,结合实际通俗地介绍了振动的基础知识和分析方法,并对工程中的大量实例,进行了深入浅出的分析和讨论。

本书主要适用于高中以上、相当于大学文化程度的广大读者,有关专业的师生及科技人员参考。

振 动 分 析 基 础

庄表忠、黄志毅 编著

责任编辑 徐一帆

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

1985 年 11 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1985 年 11 月 第 一 次 印 刷 印张: 7 5/16

印数: 0001—6,700

字数: 160,000

统一书号: 13031·2985

本社书号: 4144·13-2

定 价: 1.40 元

前 言

人类生活在振动世界里。地面有汽车、火车、拖拉机；地下有铁道；天空里有飞机；海洋里有舰船等等；就连茫茫的宇宙中，也有电磁波在不停地发射和传播。可以说，它们都在不停地振动着。就人体本身来说，心脏的跳动，肺部的呼吸等等在某种意义上来说，也都是一种振动。所以说，在自然界中振动现象比比皆是。在某些情况下，振动往往占有突出的地位。由于振动在机械力学、流体力学、声学、电学、自动控制、生物工程等各个领域占有比较重要的地位，因此人们对它产生浓厚的兴趣是不足为怪的。

二千多年前，人们就利用振动把衣服上的尘埃抖掉，到1673年，C. 惠更斯(C. Huygens)首次提出物理摆理论。1914年以前，人们关心的机械振动主要是如何避免共振，因此研究重点集中在机械结构的固有频率、衰减率、共振和主振型的确定上。1921年H. 霍尔兹(H. Holzer)提出解决轴系扭转振动问题的方法。在振动问题中，利用微振动理论解决了不少规则振动问题，但有些问题仍然得不到解决。到了二十世纪三十年代，机械振动的研究开始由线性向非线性方向发展。五十年代起随着高速飞机与火箭技术的发展，机械振动也从简谐振动发展到随机振动。七十年代，自动控制理论、电子计算机及

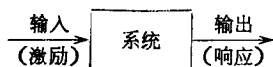
先进的振动测量技术的出现,使人们有可能解决更加复杂的振动问题,促进了振动学科的迅速发展。

机械振动的分类方法很多,按振动规律可分为:简谐振动、非简谐振动、随机振动;按产生振动原因可分为:自由振动、受迫振动、自激振动、参变振动;按自由度多少可分为:单自由度系统振动、多自由度系统振动、弹性体振动;按振动位移特征可分为:角振动、直线振动;按系统结构参数特征又可分为:线性振动、非线性振动。

工程中有大量振动问题需要人们去研究、分析和处理,因此掌握振动规律就显得十分重要,也只有掌握了振动的规律和特征以后,才能有效地利用其有益的方面,限制其有害的方面。近期,振动基础知识已成为工程技术人员正确进行产品和结构的动力特性设计所必备的知识,以便在实际工程中能够分析振动问题,鉴定工程质量,监控机器运行情况,诊断振动原因和防止或隔离振动的方法等等。

振动问题所涉及的内容可以用一个框图笼统表示。无论机械产品、结构物、装置或零部件等,都是由若干互相联系的物体构成的一个整体,都可以理解为框图中的系统。机械系统当受有随时间变化的外扰力作用时,则称此外扰力为激励。在特定条件下系统由于激励产生的运动或其它输出称为响应。包含激励、系统和响应的振动问题,按照此三者中哪一个是未知的,一般分为三类问题:

(1)“振动设计”问题,已知系统的特性和激励的信息来研究响应,又称“响应预测”问题。



(2) “系统识别”问题,已知激励和响应来识别系统的特性。

(3) “环境预测”问题,已知系统特性和响应去推断激励的资料。

随着我国四个现代化建设的加速进展,国防、工农业生产和科学研究部门遇到的振动问题日益增多,为此,我们将工程中及日常生活中常见的振动问题,整理成这个有限的基础知识供读者参考与引用。

本书在编写过程中得到西安交通大学阳含和教授的热情支持,他在百忙中对全文仔细审阅,提出了许多宝贵的、指导性的修改意见。浙江大学王行新及陈乃立也给予了有力的支持,谨向他们致以谢意。

由于我们理论水平和语文修养不高,在内容上和讲述方法上必然有不少缺点。欢迎读者来信对本书提出宝贵的意见。

编者

1984年于浙江大学

目 录

前言	
符号表	vii
第一章 振动的描述方法	1
1-1 什么叫振动?	1
1-2 振动有害影响举例	3
1-3 振动的利用举例	7
1-4 周期振动与非周期振动	11
1-5 简谐振动的图线	13
1-6 什么叫相位角	18
1-7 多个简谐振动的合成	21
1-8 周期振动的频谱分析	29
1-9 振动系统中的机械能	34
第二章 自由振动	37
2-1 振动问题的简化模型	37
2-2 离散振动系统组成部分的特征	43
2-3 单自由度线性系统的自由振动	47
2-4 粘性阻尼对自由振动的影响	57
2-5 对数衰减率	63
2-6 计算固有频率的能量法	66
2-7 单自由度非线性保守系统的自由振动	69
2-8 单自由度非线性非保守系统的阻尼振动	72
第三章 受迫振动	75
3-1 单自由度系统受谐波激励的响应	76

3-2	不平衡转子激起的受迫振动	87
3-3	支承作谐波激励引起的受迫振动	90
3-4	隔振原理	94
3-5	单自由度非线性系统的受迫振动特征	100
第四章	自激振动与参变振动	106
4-1	什么叫自激振动?	107
4-2	由机械控制的自激振动	109
4-3	摩擦会引起自激振动吗?	112
4-4	滑动摩擦副匀速驱动出现的“爬行”	122
4-5	滚动的轮子为什么会“摇晃”?	123
4-6	微风使高压输电线发生“跳跃”	130
4-7	“颤振”的产生与防止	136
4-8	流体机械中的“喘振”	139
4-9	自激振动的能量分析	140
4-10	什么叫参变振动?	142
第五章	随机振动概述	149
5-1	什么叫随机振动?	150
5-2	概率与统计的一些基本概念	155
5-3	随机过程的描述和怎样采样	158
5-4	随机变量在幅域和时域中的描述	163
5-5	相关分析	182
5-6	随机振动在频率域内的谱描述	200
5-7	单自由度线性系统对随机振动的响应	211
参考资料	219

符 号 表

下列主要符号是根据其第一次出现的章节或方程定义的。

\bar{P}	重力矢量
\bar{T}	拉力矢量, 切向力矢量
\bar{Q}	合力矢量
T	周期, 时间过程
f	频率
ω	圆频率, 角速度, 激励频率
α	摆角, 相位角
φ, β	相位角
A	振幅, 功
$E_{\text{动}}$	动能
$E_{\text{位}}$	位能
$E_{\text{机}}$	机械能
t	时间, 稳定距
a_n, b_n	系数
E	弹性模数, 能量
F_s	弹簧力, 恢复力
F_d	粘性阻尼力

F_m	惯性力
x_1, x_2, y	位移
\dot{x}_1, \dot{x}_2	速度
\ddot{x}_1, \ddot{x}_2	加速度
c	粘性阻尼系数
k	弹簧刚度, 整数
ω_n	固有频率
l	长度
f_A	A 点的挠度
ζ	无量纲阻尼因子
ω_d	有粘性阻尼的固有频率
δ	对数衰减率
J_P	极转动惯量
M_J	惯性扭矩
ε	角加速度, 间隙
m	质量, 转子质量
θ	角位移, 偏角
M_d	阻尼扭矩
λ_{st}	静变形
v_0	初速度
λ	单位位移, 频率比
$E_{\text{动}}^*$	参考动能
m^*	等效质量
C_{cr}	临界阻尼

K^*	等效刚度
F	激励力
P_0	激励力幅
B_0	静力偏移
B	受迫振动振幅
β_d	动力放大因子
β_{\max}	最大动力放大因子
Q	品质因数
$\Delta\omega$	半功率带宽
e	偏心距
M	总质量, 弯矩
ξ	移动坐标, 空间坐标
X	激励振幅值
Y	响应振幅值
η	隔振传递系数
R	合力, 半径
R_{\max}	合力最大值
H	动反力最大值
M_s	恢复力矩
l	摆长
ΔP	有阻尼力
Q	转速
F	离心力
Δ	迴转运动半径

ω_c	临界转速
β	轴长与轴径比
p	比压
φ	飘动角
ψ	摇晃角
ω^*	频度
μ	事件出现次数
N	试验次数, 样点数
P	概率
$P_{(A B)}$	条件概率
$X[t]$	随机过程
$x_i(t)$	某次采样函数
$F(x)$	概率分布函数
$f(x)$	概率密度函数
$F(x, y)$	二维概率分布函数
$f(x, y)$	二维概率密度函数
m'_x	统计平均
D'_x	统计方差
c'_{xy}	统计相关矩(协方差)
m_x	概率平均(数学期望)
D_x	概率方差
c_{xy}	概率相关矩
σ_x, σ_y	标准离差
x_{rms}	均方根值

$E[x^2]$	均方值
$\mathcal{L}[y]$	拉普拉斯变换
$\delta(f)$	脉冲函数
σ	应力
\dot{X}, \dot{Y}	中心化了的变量
$\phi(\tau)$	相关函数
$\phi_{xx}(\tau)$	自相关函数
$\phi_{xy}(\tau), \phi_{yx}(\tau)$	互相关函数
τ	时间坐标移动值
$S_{xx}(\omega), S_{yy}(\omega)$	自功率谱密度函数(双边)
$W_{xx}(f), W_{yy}(f)$	自功率谱密度函数(单边)
$H(\omega)$	频率响应函数
$S_{xy}(\omega), S_{yx}(\omega)$	互谱密度函数

第一章 振动的描述方法

1-1 什么叫振动？

你能在世界上找到不运动的物质吗？确实是找不到的，世界上所有存在的物质，都是在运动着的，无非是运动形式各有不同而已。

振动是物体运动的一种特殊形式，它的特点是某些物理量(如位移、速度、加速度、电流、压力等等)时大时小反复变化的一种运动。例如图 1-1，把一个小球拴在一根不会伸长的细线下端，如果线的质量与小球的质量相比较，小得可以略去不计，而小球的直径与细线长度比较，也显得很小时，人们称这种装置为单摆。

单摆处在铅垂的平衡位置 M ，若使单摆从平衡位置 M 向旁边偏离到 M' 处，放开手以后，单摆就会在铅垂的平衡位置附近左右来回摆动。从 M' 经过 M 到达 M'' ，再从 M'' 经过 M 返回到 M' 完成了一次振动，并继续这样重复地摆动下去。这样，确定单摆位置的角位移 α ，时而增大、时而减小反复地变化着，这种物体在一定位置附近随着时间作往复运动，称为机械振动。这一位置称为平衡位置。更广义地说，物体或某种状态随着时间往复变化的现象，叫做振动。

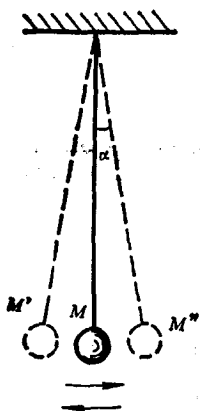


图 1-1 单摆

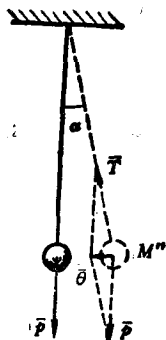


图 1-2 单摆的受力分析

单摆为什么会振动呢？让我们从单摆所受的力和位移之间的关系来寻找振动的原因（图 1-2）。当小球处于铅垂的静止平衡位置时，作用在小球上的重力 P （矢量记号）与线拉力 T 组成平衡力系。当小球偏离到位置 M'' 时，重力 P 和线的拉力 T 不在同一条直线上，它们不再平衡。把 P 和 T 两个力用平行四边形法则* 合成一个合力 Q ， Q 力的方向指向平衡位置，就是这个 Q 力欲使小球有返回到平衡位置趋势，人们称此力为恢复力。

现在，我们知道单摆受到初始扰动以后（从平衡位置上使小球偏离平衡位置一个位移，然后突然释放；或在平衡位置上锤击小球，使小球获得一个初速度），由于恢复力总是要使小

* 平行四边形法则——以 P, T 两力为边所构成的平行四边形的对角线就表示合力 Q 的大小和方向。

球回到平衡位置上去,又由于小球有质量而具有惯性*, 要保持小球的原来运动状态,在小球运动到平衡位置时,表现为要越过平衡位置继续运动. 所以,在恢复力和惯性两个因素交替作用下,使单摆一直振动下去. 这就是单摆振动的原因. 也是其它相类似物体振动的原因.

在自然界中,都非常广泛地存在着声、光、电磁波等等,这些就是广义意义上的振动现象,它使人们在各个方面得到有益的应用. 然而,振动也会带来有害影响,例如地震、波浪、高速运转机械的振动等等,它们在多数场合是有害的,防止这样的振动使其变为无害或最低的损害是科技工作者重要的任务,下面以若干例子说明振动带来的危害.

1-2 振动有害影响举例

图 1-3(a) 表示汽轮机主轴, 其上有多个叶轮, 每个叶轮

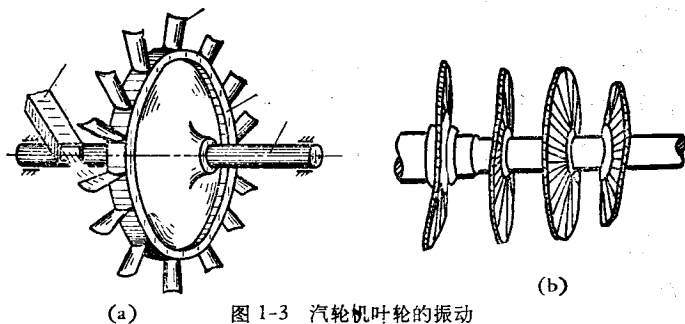


图 1-3 汽轮机叶轮的振动

* 惯性——牛顿第一定律指出, 任何物体都具有一种保持其原来运动状态的特性. 我们称这种特性为物体的惯性.

上均装有叶片。汽轮机运转时，由于主轴不可避免地存在着微小的偏心引起主轴发生振动，叶轮和叶片出现了明显的变形，如图 1-3(b) 所示，汽轮机运转时有可能发生叶轮与固定隔板和导气叶轮相碰击，以至于碰坏叶片等导致整个汽轮机的损坏，这类事故的经济损失是巨大的，因而要从设计工作开始就要给以注意，安装时又必需进行静平衡与动平衡。

图 1-4 表示大型化肥厂的空气压缩机安装在钢结构的厂房里。当卧式活塞式空气压缩机运转时，活塞作水平方向的往复运动，活塞来回运动一次，机器的质量中心（简称质心*）相应的在水平方向来回运动一次，在垂直方向也上下运动一次，质心的加速度在垂直和水平两个方向也变动一次，随之而来的运动惯性力对厂房结构不断进行着激励，导致厂房在铅垂和水平两个方向发生受迫振动，有关受迫振动将在第三章中专门介绍。如果厂房设计得不合理或者已经合理设计好的厂房因使用者随便改变压缩机的工作转速，那么，将发生振动加剧，使厂房变形过大以至于有发生毁坏的危险。

图 1-5 表示工厂烟囱在风力作用下发生摇摆振动的情形，与此相类似的电视塔、水塔、电线杆等等高大结构物也会发生这样的振动。烟囱振动时，有时顶端移动距离将达到 40—50 厘米，严重时会使结构发生断裂或倒塌。

图 1-6 表示汽车在凹凸不平的道路上行驶，受到路面不断激励所发生的振动。设计时，汽车各部件的强度要能经受

* 质心——一个质点系由 n 个质量为 m_1, m_2, \dots, m_n 的诸质点所组成，则其总质量 $M = \sum m$ 所集中作用的一个几何点称质量中心简称质心。