建筑结构设计及工程应用丛书

# 建筑结构抗震设计及工程应用

王昌兴 主编

中国建筑工业出版社

建筑结构设计及工程应用丛书

# 建筑结构抗震设计及工程应用

王昌兴　主编

中国建筑工业出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

建筑结构抗震设计及工程应用/王昌兴主编. —北京：中国建筑工业出版社，2008

（建筑结构设计及工程应用丛书）

ISBN 978-7-112-10080-4

Ⅰ. 建… Ⅱ. 王… Ⅲ. 建筑结构—抗震设计 Ⅳ. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 065111 号

本书系统介绍了建筑结构抗震设计所需的相关知识。主要包括：振动和地震的基本知识；抗震设计的基本要求；多层砌体结构房屋及其地基基础的抗震设计；钢筋混凝土框架、内框架、异形柱、抗震墙、框架-抗震墙等结构房屋及其地基基础的抗震设计；非结构构件的抗震设计；隔震、减震与结构控制初步；作者根据长期以来的设计经验，在第 14 章对抗震设计优化提出了建议。在设计优化的同时，作者不忘提醒各位同仁牢记安全第一，特别请律师简单介绍了我国的建筑工程质量安全法律体系。

本书可为建筑结构设计、监理及其他项目管理人员提供帮助，也可供大学高年级学生学习抗震知识时参考。

* * *

责任编辑：赵梦梅 刘瑞霞 刘婷婷

责任设计：赵明霞

责任校对：王雪竹 张 虹

建筑结构设计及工程应用丛书

**建筑结构抗震设计及工程应用**

**王昌兴 主编**

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京二二〇七工厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：16½ 字数：410 千字

2008 年 9 月第一版 2008 年 9 月第一次印刷

印数：1—3500 册 定价：**36.00** 元

ISBN 978-7-112-10080-4

(16883)

# 丛书编写委员会

**主　编：**（以姓氏笔画为序）

王亚勇　江见鲸　朱炳寅　郭继武

**编　委：**王昌兴　何浙浙　宋振森　张惠英

李　静　李晨光　姚　谏　胡天兵

胡孔国　蒋秀根　黎　钟

# "建筑结构设计及工程应用丛书"出版说明

随着我国建设事业的迅猛发展，需要越来越多素质高、实践能力强的建设人才。高等院校已为学生打下坚实的理论及其应用的基础，但从学校到社会实践还需学生向有经验的工程人员学习，并结合实践磨练和提高。在技术日新月异、专业纷繁交错的今天，即使已有一些经验的工程人员，也要不断巩固已有的理论，吸收新的知识和借鉴别人的经验。我社早年出版过一套"建筑结构基本知识丛书"，供在职的初级技术人员学习参考应用，且随着我国建筑工程技术人员水平的提高而经多次修订，但今日的要求远非昔日可比，这套丛书已不能满足今日走向社会的大学生和在职人员的需要。

为了沟通理论与实践、学校教育与社会实际，我社在清华大学、浙江大学、中国建筑科学研究院、中国建筑设计研究院等多所高等院校和研究设计单位部分具有深厚理论基础和丰富实践经验的教授和高级工程师大力支持下，对上述丛书重新组织，编写了这套"建筑结构设计及工程应用丛书"，目的是给新参加建筑结构设计的大专院校学生，以及建筑结构设计、施工、监理人员提供参考。

丛书内容本着加深对基本概念和基本理论的理解，淡化理论计算分析过程的推导，着重理论分析与工程实践的联系，尤其突出从理论、规范规定到在实际工程中的具体应用，以及对实际问题包括电算结果的判断与分析，尽量介绍一些在实践中已得到广泛应用的实用分析方法和简捷设计图表，以求指出一条通向实践的方便之路。

本丛书包括以下10个分册：

◆《钢筋混凝土结构设计及工程应用》
◆《预应力混凝土结构设计及工程应用》
◆《砌体结构设计及工程应用》
◆《钢结构设计及工程应用》
◆《轻型钢结构设计及工程应用》
◆《建筑结构抗震设计及工程应用》
◆《多高层混凝土结构设计及工程应用》
◆《建筑地基基础设计及工程应用》
◆《建筑加固与改造》
◆《工程力学》

希望本丛书的出版能对即将从事建筑结构设计的大学生给予引导，对正在从事建筑结构设计的人员进一步提高提供参考。在设计、施工专家们的支持下，我社将会组织出版更多实用的技术丛书，以满足广大工程技术人员的需要。

中国建筑工业出版社

# 前言

工程设计像其他复杂事物一样，有无数多个“解”。也就是说，我们取得的任何一个解都不是最优解，都能找到一个更优的解。可见我们的发挥空间之大。

随着社会的发展，建立节约型社会的思想已深入人心。作者较早提出了设计理财的概念，并较早应用到了工程中，取得了一定的经验。

抗震设计优化仅是设计理财的部分工作内容。本书系统介绍了抗震设计优化所需的相关知识。可供从事建筑结构设计、监理及其他项目管理人员参考，也可供大学高年级学生学习抗震知识时参考。

本书由王昌兴主编。孙宁、严涛、陈春材、赵晓冬、张志强、王隆兴、李仁华、张春霞、沈军编写。王亚勇审阅了全书，程懋堃给予了指导，李保国给予了关心，郑媛媛完成了部分文字录入工作，在此，对他们付出的心血表示感谢。另外，作者衷心感谢被引用著作、图片的作者。

由于作者能力和时间所限，错误和不足在所难免，希望同仁谅解并指正。作者邮箱：chinaxing@yeah. net。

# 目录

# 第 1 章

# 振动的基本知识

地震时，建筑物将随地面的运动而发生振动。抗震设计时，需要用到振动的知识。

## 1.1 牛顿三大定律

牛顿三大定律是动力学的基础。

### 1.1.1 牛顿第一定律(惯性定律)

任何物体，若不受其他物体的作用，将保持静止或匀速直线运动状态。

这一定律说明，任何物体都有保持它原有运动状态不变(速度不变)的性质，这种性质称为物体的惯性。如果要改变物体的运动状态(即产生加速度)，就一定要受其他物体的作用，也就是物体之间存在力的作用。所以，这一定律也说明力与加速度必然同时存在。

### 1.1.2 牛顿第二定律(力与加速度关系定律)

物体受到合外力的作用会产生加速度。加速度的方向与合外力的方向相同，加速度的大小与合外力的大小成正比，与物体的质量成反比。即

$$F=ma \tag{1.1-1}$$

式中 $F$——物体受到的合外力；

$m$——物体的质量；

$a$——物体运动的加速度。

第二定律定量描述了力作用的效果，定量地量度了物体的惯性大小。它是矢量式，并且是瞬时关系。

由式(1.1-1)可知，物体的质量就是使物体产生单位加速度所需的合外力。欲使不同的物体产生相同的加速度，质量较大的物体需要较大的合外力，这也意味着较大的质量具有较大的惯性。

地心对物体的引力就是物体的重量 $W$，物体自由下落时的加速度称为重力加速度 $g$，它的值约为 $9.81\mathrm{m/s^2}$。根据牛顿第二定律可求出物体的质量 $m$：

$$m=\frac{W}{g} \tag{1.1-2}$$

### 1.1.3 牛顿第三定律(作用力与反作用力定律)

有作用力就必有反作用力，且两者大小相等、方向相反。作用力和反作用力在同一直

线上，但分别作用在相互作用的两个物体上。

## 1.2 动静法

动静法是解决动力学问题的一种常用方法。应用这种方法，引入惯性力的概念，就可以用我们熟悉的静力学的方法来解决动力学的问题。

设一质量为 $m$ 的质点 $M$，在主动力 $F$、约束力 $N$ 的作用下运动。此时质点沿合外力方向上产生的加速度为 $a$，质点所受合外力为 $F+N$(力 $F$、$N$ 的方向与 $a$ 的方向相同时为正，相反时为负)，根据牛顿第二定律得：

$$F+N=ma \tag{1.2-1}$$

它所建立的数学模型，直接反映了质点所受的力与质点的质量、加速度之间的瞬时关系。将上式移项后整理得：

$$F+N+(-ma)=0 \tag{1.2-2}$$

令 $Q=-ma$，可将式(1.2-2)变为：

$$F+N+Q=0 \tag{1.2-3}$$

其中 $Q$ 称为惯性力，它可表述为：质点 $M$ 在作非惯性运动的任意瞬间，对于施力于它的物体会作用一个力，这个力的方向与其加速度的方向相反，力的大小等于其质量与加速度的乘积。此式表明：在质点 $M$ 运动的任意瞬间，如果在质点 $M$ 上假想地加上一惯性力 $Q$，则此惯性力与主动力、约束力在形式上组成一平衡力系。惯性力不是真实作用在质点 $M$ 上的力，是假想的加在质点 $M$ 上的虚拟力，当质点 $M$ 与周围物体相联系时，它表现为质点 $M$ 对周围施力物体的反作用力的合力。这就是达朗贝尔原理。

应用达朗贝尔原理，可以将本来是动力学的问题，转化为我们熟悉的静力学问题来解决。亦即只要在作加速运动的物体上，假想加上惯性力，就可以认为物体在实际所受的力和假想的惯性力的共同作用下处于平衡状态，从而可用静力学平衡方程求解。这种将动力学问题转化为静力学问题的方法称为动静法。动静法是处理动力学问题的一种方法，它只在形式上采取静力平衡的公式，实质上物体仍然是运动的，由于大家比较熟悉静力平衡方程，应用这种方法来处理动力学的问题就比较方便。

## 1.3 振动的基本概念

质点的振动指的是质点相对某一位置(例如静止平衡状态所在的位置)所作的往复运动。振动的重要特征在于它是时间的函数。

振动在工程技术中也是经常碰到的。例如，车辆通过桥梁时将引起桥梁的振动；房屋在风力的作用下将发生振动；地震时建筑物的颠簸和晃动也是振动。任何实际的工程结构都可能在某种外力的作用下发生振动。

在振动过程中，结构的内力和变形不是恒定不变的，而是随着时间的变化而变化的，而且与结构所受的荷载大小不呈线性关系。在有些情况下，不大的振动荷载可能引起很大的内力和变形。结构振动时的内力和变形不但和振动荷载的大小、作用方式有关，而且和结构本身的动力特性有关。

桥梁、建筑结构等振动体系在外扰力或冲击作用下产生的振动常被称为体系对外作用的动力反应(或称动力响应)。其运动状态取决于其物理特征，包括其质量分布、弹性性能(柔度或刚度)分布以及能耗机制或称阻尼。以适当的参数来表征这些特征，形成数学模型，是动力学分析的起点。

简谐振动是最简单、最基本的振动形式。描述简谐振动时，常用到以下术语：

频率——每秒钟往复的次数或每秒钟振动的次数称为频率，常以 $f$ 表示，其单位是 Hz(赫兹)。当频率以 rad/s(弧度/秒)表示时，则称为圆频率或角频率，常以 $\omega$ 表示。

周期——振动每往复一次所需的时间，叫做振动的周期，常以 $T$ 表示，其单位是 s(秒)。显然，周期 $T$ 和频率 $f$ 互为倒数，即

$$T=f^{-1} \tag{1.3-1}$$

$f$ 与 $\omega$ 的关系为

$$f=\frac{\omega}{2\pi} \tag{1.3-2}$$

振幅——振动过程中，振动体离开平衡位置的最远距离称为振幅。

振动体系的振动可以分为自由振动和强迫振动。

当振动体系受到某种初始扰动后产生振动，但在振动过程中除体系本身弹性恢复力作用外，不再受任何外部强迫力，这种振动即称为自由振动，例如，结构受到突然撞击之后引起的振动。这时，如果不受体系内部及外部的非弹性阻尼，则振动体系会永远地振动下去，而且振幅不变。振动体系没有能量损失，体系内部所具有弹性恢复力及惯性，是使振动维持下去的基本原因。这种振动称为无阻尼的自由振动。实际上，结构在振动过程中不可能不受到内部及外部的阻尼作用。由于阻尼的作用，体系的振动将随着时间而逐渐衰减。这种振动则称为有阻尼的自由振动。

强迫振动是指振动体系在外部强迫力的持续作用下而发生的振动。例如，楼面上持续运转的马达引起的楼面振动。地震时，房屋的振动也是强迫振动。

## 1.4 单自由度弹性体系的自由振动

弹性体系受力后开始振动。当某时段没有外来干扰作用时，该时段内的振动就称为自由振动。

### 1.4.1 力学模型及其运动方程

图 1.4-1 表示单自由度体系自由振动的物理力学特征。任何线性结构体系，自由振动的主要物理力学模型是体系的惯性、弹性、能量耗散机理(阻尼)。在单自由度体系的力学模型中，每个内部特性都假定集结于一个简单的物理单元中。

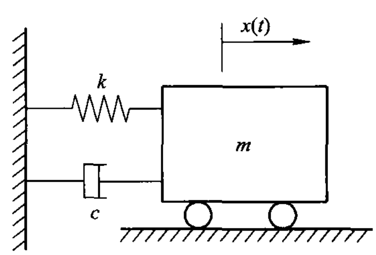


图 1.4-1 单自由度体系自由振动的力学模型

在任一时刻 $t$，质量块的位移为 $x(t)$(相对于平衡位置)，对应的速度、加速度分别为 $\dot{x}(t)$和 $\ddot{x}(t)$，则在此时刻，质量块受到的力有：

弹性恢复力，方向与位移方向相反——$f_S=-kx(t)$；

阻尼力，方向与速度方向相反——$f_D=-c\dot{x}(t)$；

惯性力，方向与加速度方向相反——$f_I=-m\ddot{x}(t)$。

根据达朗贝尔原理，以上三个力构成一个平衡力系，于是有：

$$f_I+f_D+f_S=0 \tag{1.4-1}$$

即可得到线性单自由度体系的运动方程：

$$m\ddot{x}(t)+c\dot{x}(t)+kx(t)=0 \tag{1.4-2}$$

或

$$\ddot{x}(t)+2\zeta\omega\dot{x}(t)+\omega^2x(t)=0 \tag{1.4-3}$$

式中　$2\zeta\omega=\dfrac{c}{m}$，$\zeta=\dfrac{c}{2m\omega}=\dfrac{c}{2\sqrt{mk}}$，$\zeta$ 称为阻尼比。$\zeta=c=0$ 时称为无阻尼；

$\omega=\sqrt{\dfrac{k}{m}}$，叫做无阻尼的自振圆频率。

### 1.4.2　单自由度弹性体系的无阻尼自由振动

当假定体系在振动过程中没有能量耗散，即不考虑阻尼对振动的影响时，单自由度弹性体系自由振动的运动方程可写为：

$$m\ddot{x}(t)+kx(t)=0 \tag{1.4-4}$$

或

$$\ddot{x}(t)+\omega^2x(t)=0 \tag{1.4-5}$$

其中 $\omega^2=k/m$，式(1.4-5)为一个二阶常系数线性微分方程，其一般解为

$$x(t)=B\cos\omega t+C\sin\omega t \tag{1.4-6}$$

式中常数 $B$ 和 $C$ 可由自由振动的初始条件确定。设在自由振动的初始时刻($t=0$ 时)，初始位移 $x(0)=x_0$，初始速度 $\dot{x}(0)=v_0$，根据这两个条件，可确定常数 $B$ 和 $C$：

$$B=x_0,\ C=v_0/\omega$$

于是，单自由度体系无阻尼自由振动的解可表达为

$$x(t)=x_0\cos\omega t+\frac{v_0}{\omega}\sin\omega t \tag{1.4-7}$$

它可改写成如下的单项式形式

$$x(t)=A\sin(\omega t+\psi) \tag{1.4-8}$$

式中　$A=\sqrt{x_0^2+(v_0/\omega)^2}$，$\psi=\arctan\dfrac{\omega x_0}{v_0}$

由式(1.4-8)可知，无阻尼自由振动是一个简谐振动，它的周期和频率分别是

$$T=\frac{2\pi}{\omega},\ f=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi}$$

频率 $f$ 或周期 $T$ 反映了结构的主要动力特征。由

$$\omega^2=\frac{k}{m}\quad 或\quad \omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$$

可得

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

可见，自振周期与体系的质量和刚度有关：质量越大，周期越长；而刚度越大，周期越短。自振周期是体系的一种固有属性，与外力无关。

对于无阻尼自由振动而言，它的特性如下：

$$x(t)=A\sin(\omega t+\psi) \tag{1.4-9}$$

于是
$$\ddot{x}(t)=-A\omega^2\sin(\omega t+\psi) \tag{1.4-10}$$

惯性力
$$I(t)=-m\ddot{x}(t)=mA\omega^2\sin(\omega t+\psi) \tag{1.4-11}$$

由以上各式可以看出，在无阻尼自由振动中，位移 $x(t)$、加速度 $\ddot{x}(t)$和惯性力 $I(t)$都是按正弦规律同步变化，三者同时达到最大值。

### 1.4.3 单自由度弹性体系的有阻尼自由振动

在无阻尼自由振动中，振动是永不衰减的。然而实际情况并非如此，无论什么结构，它的自由振动都呈现一种衰减振动。这表明结构中存在一种耗能的因素——阻尼。阻尼的机制比较复杂。目前常用黏滞阻尼理论和复阻尼理论来描述阻尼。其中，黏滞阻尼理论更加便于计算。在黏滞阻尼理论中，假定阻尼力与速度成正比，但方向与速度相反。根据黏滞阻尼理论建立起来的单自由度体系的运动方程是一个线性微分方程：

$$\ddot{x}(t)+2\zeta\omega\dot{x}(t)+\omega^2x(t)=0 \tag{1.4-12}$$

此振动方程同样是一个二阶常系数线性微分方程，对于实际的房屋结构，阻尼比 $\zeta<1$，在此情况下，微分方程的通解为

$$x(t)=e^{-\zeta\omega t}(B\cos\omega_D t+C\sin\omega_D t) \tag{1.4-13}$$

式中 $\omega_D=\omega\sqrt{1-\zeta^2}$称为有阻尼自由振动的圆频率，而常数 $B$ 和 $C$ 可由运动的初始条件确定为

$$B=x_0,\ C=\frac{v_0+\zeta\omega x_0}{\omega_D}$$

于是，单自由度体系有阻尼振动的解为

$$x(t)=e^{-\zeta\omega t}\left(x_0\cos\omega_D t+\frac{v_0+\zeta\omega x_0}{\omega_D}\sin\omega_D t\right) \tag{1.4-14}$$

它可以写出如下的单项形式

$$x(t)=Ae^{-\zeta\omega t}\sin(\omega_D t+\psi) \tag{1.4-15}$$

式中
$$A=\sqrt{x_0^2+\left(\frac{v_0+\zeta\omega x_0}{\omega_D}\right)^2}$$

$$\psi=\arctan\left(\frac{\omega_D x_0}{v_0+\zeta\omega x_0}\right)\quad(\zeta<1.0)$$

由式(1.4-15)可知，弱阻尼情况下的自由振动是一个衰减振动，即振动的振幅随时间的增长而减少，且阻尼比越大，振幅的衰减越快。虽然它不是严格定义上的那种周期运动，但质点在相邻两次通过静平衡位置时，其时间间隔是相等的，习惯上仍称此时间间隔 $T_D=2\pi/\omega_D$为周期，并称这种振动为衰减性的周期振动。$\omega_D$可称为此衰减振动的圆频率，$T_D$可称为有阻尼振动的自振周期。

对于实际的房屋结构，阻尼比 $\zeta$ 一般为 0.02～0.05，从而有

$$\omega_D=\omega\sqrt{1-\zeta^2}=(0.9998\sim0.9987)\omega\approx\omega$$

即有阻尼时的圆频率和无阻尼时的圆频率非常接近，在实际计算中可近似地取 $\omega_D=\omega$。

# 1.5 单自由度弹性体系的强迫振动

## 1.5.1 力学模型及其运动方程

图 1.5-1 表示单自由度体系强迫振动的物理力学特征，与图 1.4-1 相比，振动体系中增加了随时间变化的外部作用(强迫力)。根据达朗贝尔原理可得到单自由度弹性体系强迫振动的运动方程：

$$m\ddot{x}(t)+c\dot{x}(t)+kx(t)=P(t) \tag{1.5-1}$$

或

$$\ddot{x}(t)+2\zeta\omega\dot{x}(t)+\omega^2x(t)=\frac{P(t)}{m} \tag{1.5-2}$$

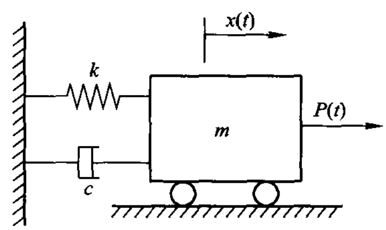

图 1.5-1 单自由度体系强迫振动的力学模型

## 1.5.2 简谐荷载下无阻尼体系的动力反应

设无阻尼体系($\zeta=0$)承受如下的简谐荷载：

$$P(t)=F\sin\theta t \tag{1.5-3a}$$

这里 $\theta$ 是简谐荷载的圆频率，$F$ 是荷载的最大值，称为荷载幅值。将式(1.5-3$a$)和 $\zeta=0$代入式(1.5-2)中，可得运动方程如下：

$$\ddot{x}(t)+\omega^2x(t)=\frac{F}{m}\sin\theta t \tag{1.5-3b}$$

先求方程的特解。设特解为

$$x(t)=A\sin\theta t \tag{1.5-3c}$$

将式(1.5-3$c$)代入式(1.5-3$b$)中，得

$$(-\theta^2+\omega^2)A\sin\theta t=\frac{F}{m}\sin\theta t$$

由此，得

$$A=\frac{F}{m(\omega^2-\theta^2)}$$

由此，特解为

$$x(t)=\frac{F}{m\omega^2\left(1-\frac{\theta^2}{\omega^2}\right)}\sin\theta t \tag{1.5-3d}$$

如令

$$x_{st}=\frac{F}{m\omega^2}=\frac{F}{k} \tag{1.5-3e}$$

则 $x_{st}$可叫做最大静位移(即把荷载最大值 $F$ 当作静荷载作用时结构所产生的位移)，而特解(1.5-3$d$)可写成

$$x(t)=x_{st}\frac{1}{1-\frac{\theta^2}{\omega^2}}\sin\theta t \tag{1.5-3f}$$

微分方程得齐次解已在上节求出，故得通解如下：

$$x(t)=B\cos\omega t+C\sin\omega t+x_{st}\frac{1}{1-\frac{\theta^2}{\omega^2}}\sin\theta t \tag{1.5-3g}$$

积分常数 $B$ 和 $C$ 需由初始条件来求。设在 $t=0$ 时的初始位移和初始速度均为 0，则得

$$B=0,\ C=-x_{st}\frac{\frac{\theta}{\omega}}{1-\frac{\theta^2}{\omega^2}}$$

代入式(1.5-3g)，即得

$$x(t)=x_{st}\frac{1}{1-\frac{\theta^2}{\omega^2}}\left(\sin\theta t-\frac{\theta}{\omega}\sin\omega t\right) \tag{1.5-4}$$

由此看出，振动是由两部分合成的：第一部分按荷载频率 $\theta$ 振动，第二部分按自振频率 $\omega$ 振动。由于在实际振动过程中存在着阻尼力，因此按自振频率振动的那一部分将会逐渐消失，最后只余下按荷载频率振动的那一部分。我们把两种频率振动同时存在的阶段称为"过渡阶段"，而把后来只按荷载频率振动的阶段称为"平稳阶段"。由于过渡阶段延续的时间较短，因此在实际问题中平稳振动阶段比较重要。

振动在平稳阶段中任意时刻的位移为

$$x(t)=x_{st}\frac{1}{1-\frac{\theta^2}{\omega^2}}\sin\theta t$$

最大位移(即振幅)为

$$[x(t)]_{max}=x_{st}\frac{1}{1-\frac{\theta^2}{\omega^2}}$$

上述最大位移即为最大动位移。

最大动位移与最大静位移的比值叫做动力系数，用 $\beta$ 表示，即

$$\beta=\frac{[x(t)]_{max}}{x_{st}}=\frac{1}{1-\frac{\theta^2}{\omega^2}} \tag{1.5-5}$$

由此看出，动力系数 $\beta$ 是频率比值 $\theta/\omega$ 的函数。函数图形如图 1.5-2 所示，其中横坐标为 $\theta/\omega$，纵坐标为 $\beta$ 的绝对值(注意，当 $\theta/\omega>1$ 时，$\beta$ 为负值)。

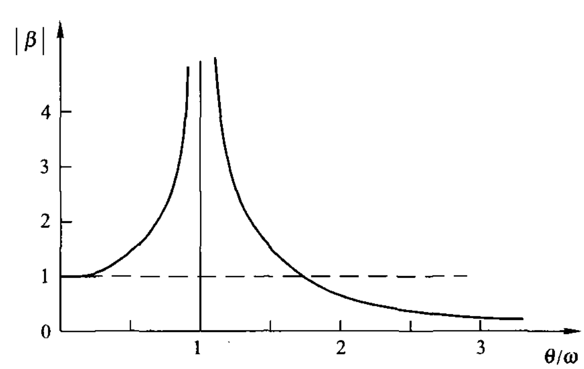


图 1.5-2 无阻尼体系简谐荷载作用下动力系数曲线

由图 1.5-2 可看出如下特性：

(1) 当 $\theta/\omega\to 0$ 时，动力系数 $\beta\to 1$。这时简谐荷载的数值虽然随时间变化，但变化得非常慢(与结构的自振周期相比)，因而可作为静荷载处理。

(2) 当 $0<\theta/\omega<1$ 时，动力系数 $\beta>1$，且 $\beta$ 随 $\theta/\omega$ 的增大而增大。

(3) 当 $\theta/\omega\to 1$ 时，动力系数 $|\beta|\to\infty$。即当荷载频率 $\theta$ 接近结构自振频率 $\omega$