

# 三、桥梁动载试验

# 桥梁动载试验

- 1.动力荷载（车辆、人群、风力、地震）作用下产生振动。
- 2.结构动力问题采用理论分析与实验测试相结合。
- 3.桥梁结构的动力特性（振型、频率和阻尼比）是桥梁承载力评定的重要参数，也是识别桥梁结构工作性能和桥梁抗震分析的重要参数

# 桥梁动载试验

桥梁结构的动力特性:

- 振型
- 频率
- 阻尼比

# 桥梁动载试验

## ■ 结构振动关系



# 桥梁动载试验

三类基本问题：

- 测定动荷载的动力特性，即数值、方向、频率、作用规律等
- 测定桥梁结构的动力特性，即自振频率、阻尼比、振型等桥梁结构的模态参数。
- 测定桥梁结构在动荷载作用下的强迫振动，即动位移、动应力、冲击系数等。

# 桥梁动载试验

- 桥梁结构的振动试验包括：
  - 模拟地震试验
  - 抗风试验
  - 疲劳试验

本课程主要介绍桥梁结构动力特性和动载响应的常规试验与分析

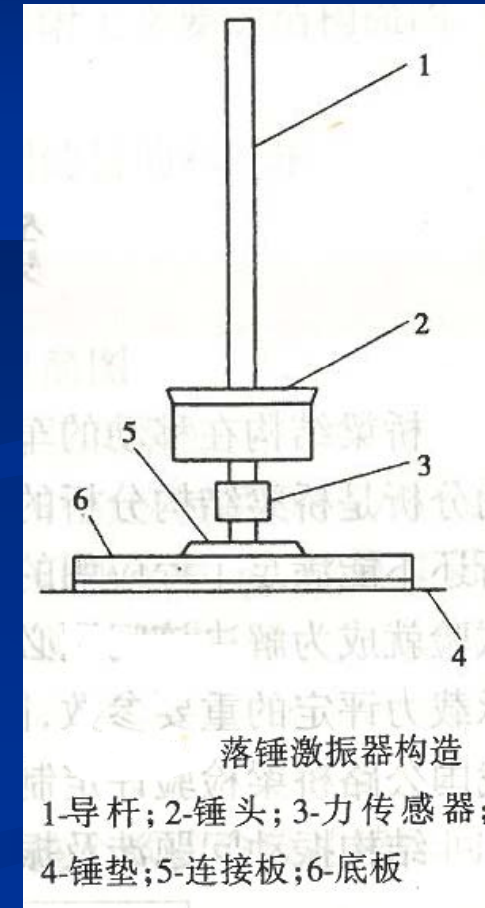
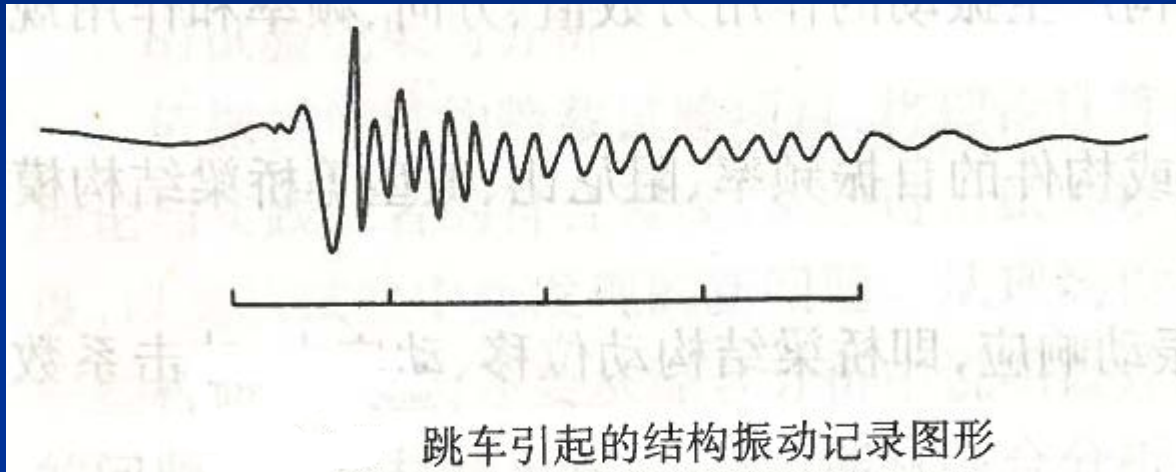
# 桥梁动载试验-激振方法 (1)

- 自振法：使桥梁产生有阻尼的自由衰减振动。
- 突加荷载法（冲击法）
- 突卸荷载法（位移激振法）

# 桥梁动载试验-激振方法 (1)

## 突加荷载法 (冲击法)

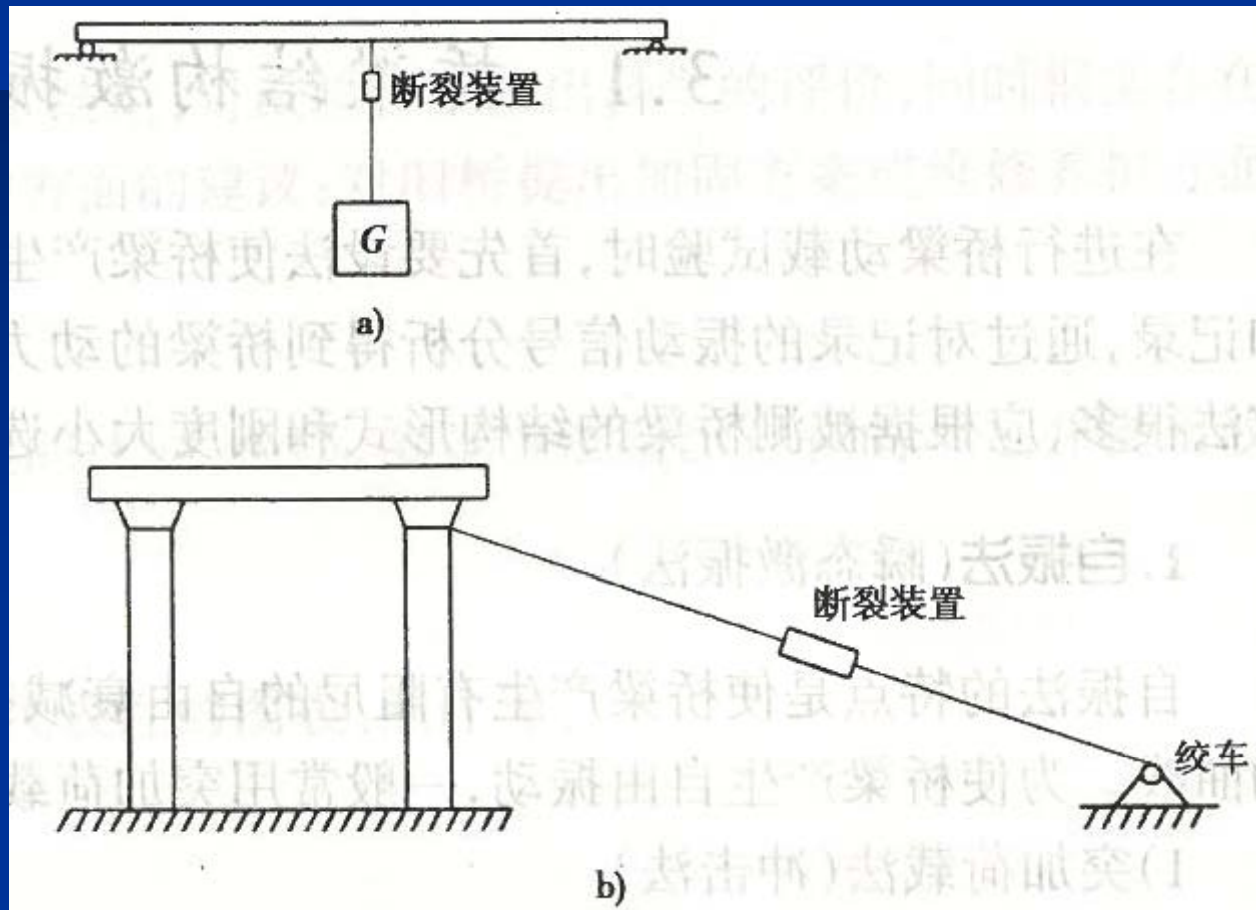
- 落锤激振器
- 跳车试验





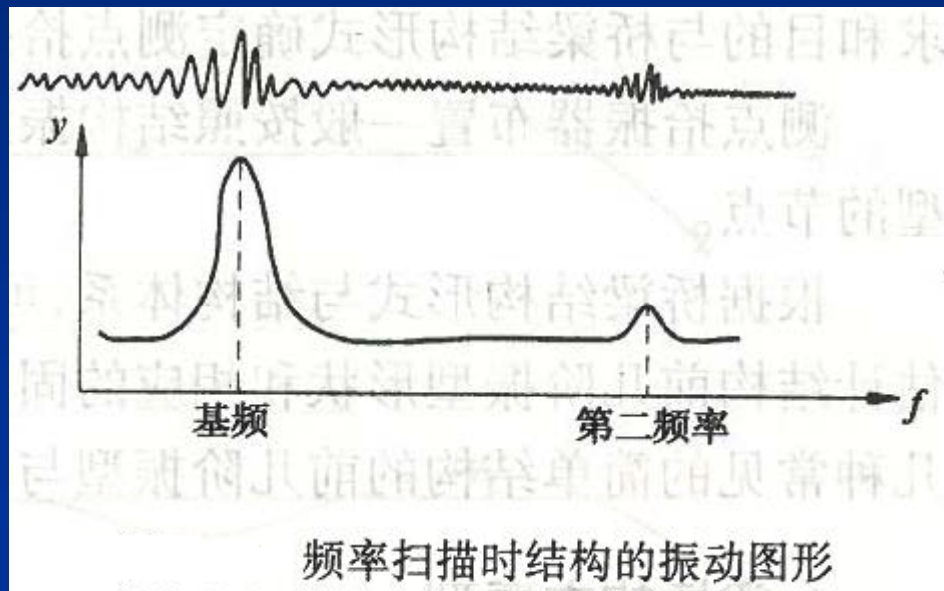
# 桥梁动载试验-激振方法 (1)

## 突卸荷载法 (位移激振法)



# 桥梁动载试验-激振方法 (2)

- 共振法：利用激振器对结构施加激振力，使结构产生强迫振动，改变激振力的频率而使结构产生共振现象，并借助共振现象来确定结构的动力特性。



# 桥梁动载试验-激振方法 (2)

## ■ 共振法—跑车试验

下图为车辆以21公里/小时的速度驶过跨径25米的预应力混凝土简支梁桥时跨中挠度的时历曲线



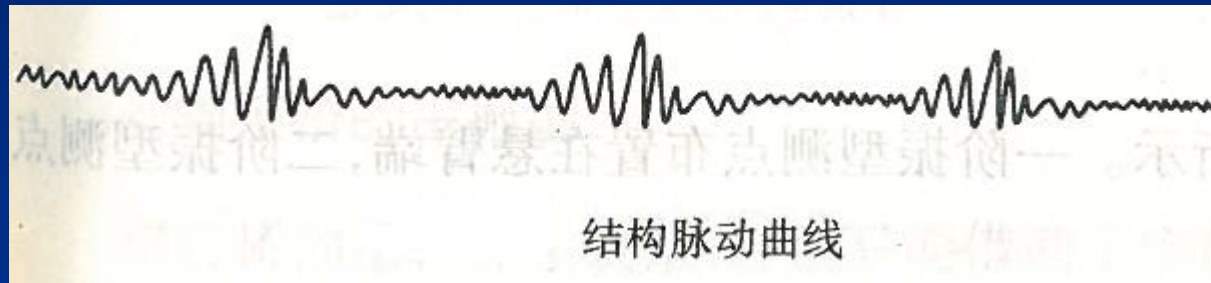
# 桥梁动载试验-激振方法（3）

脉动法：利用外界各种因素所引起的结构微小而不规则的振动来确定结构的动力特性。

附近的车辆、机器等振动或附近地壳的微小破裂和远处的地震传来的微振动（脉动）

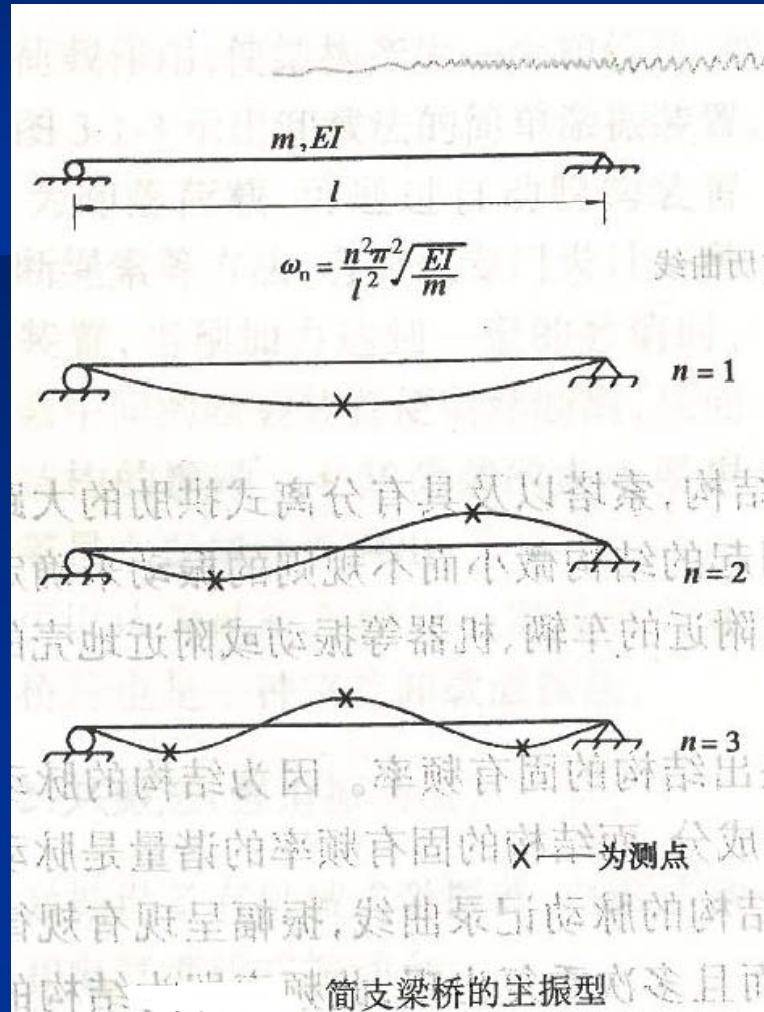
# 桥梁动载试验-激振方法 (3)

## 脉动法——桥梁模态试验



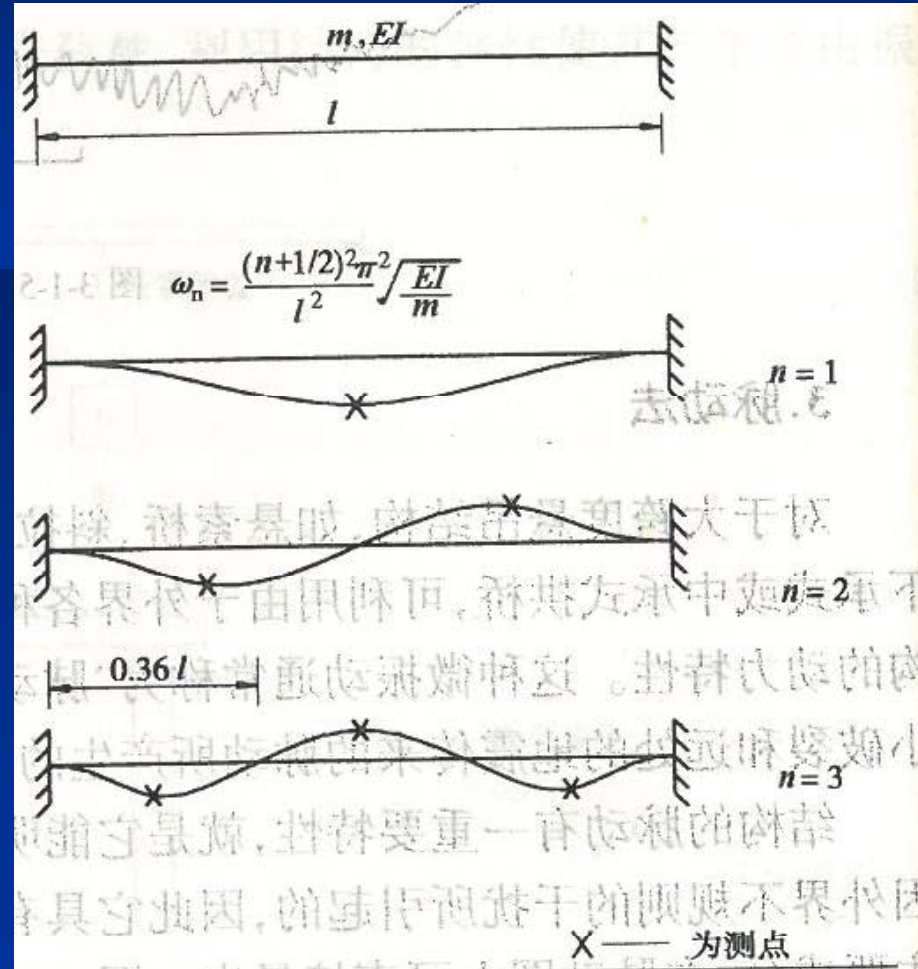
# 桥梁动载试验-桥梁的主振型 (1)

## ■ 简支梁的主振型



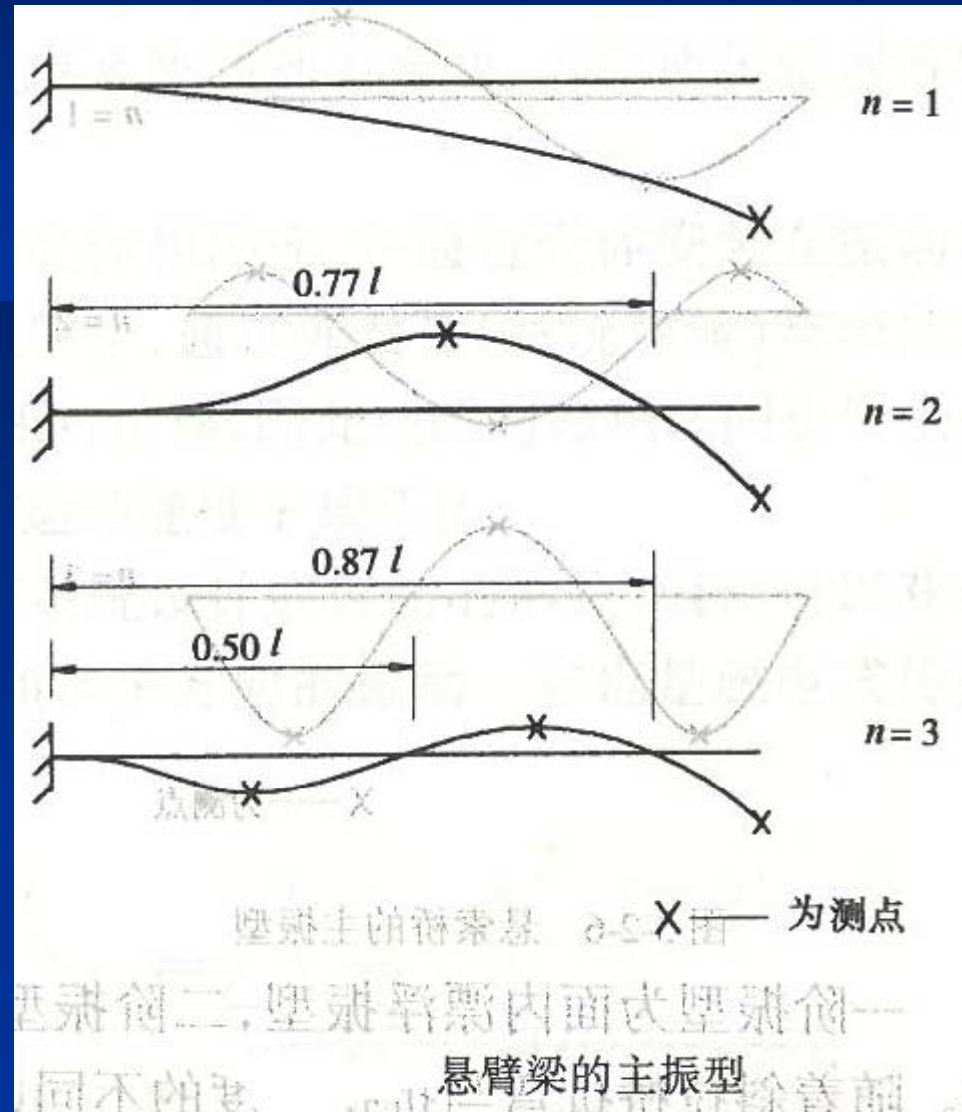
# 桥梁动载试验-桥梁的主振型 (2)

## ■ 固端梁的主振型



# 桥梁动载试验-桥梁的主振型 (3)

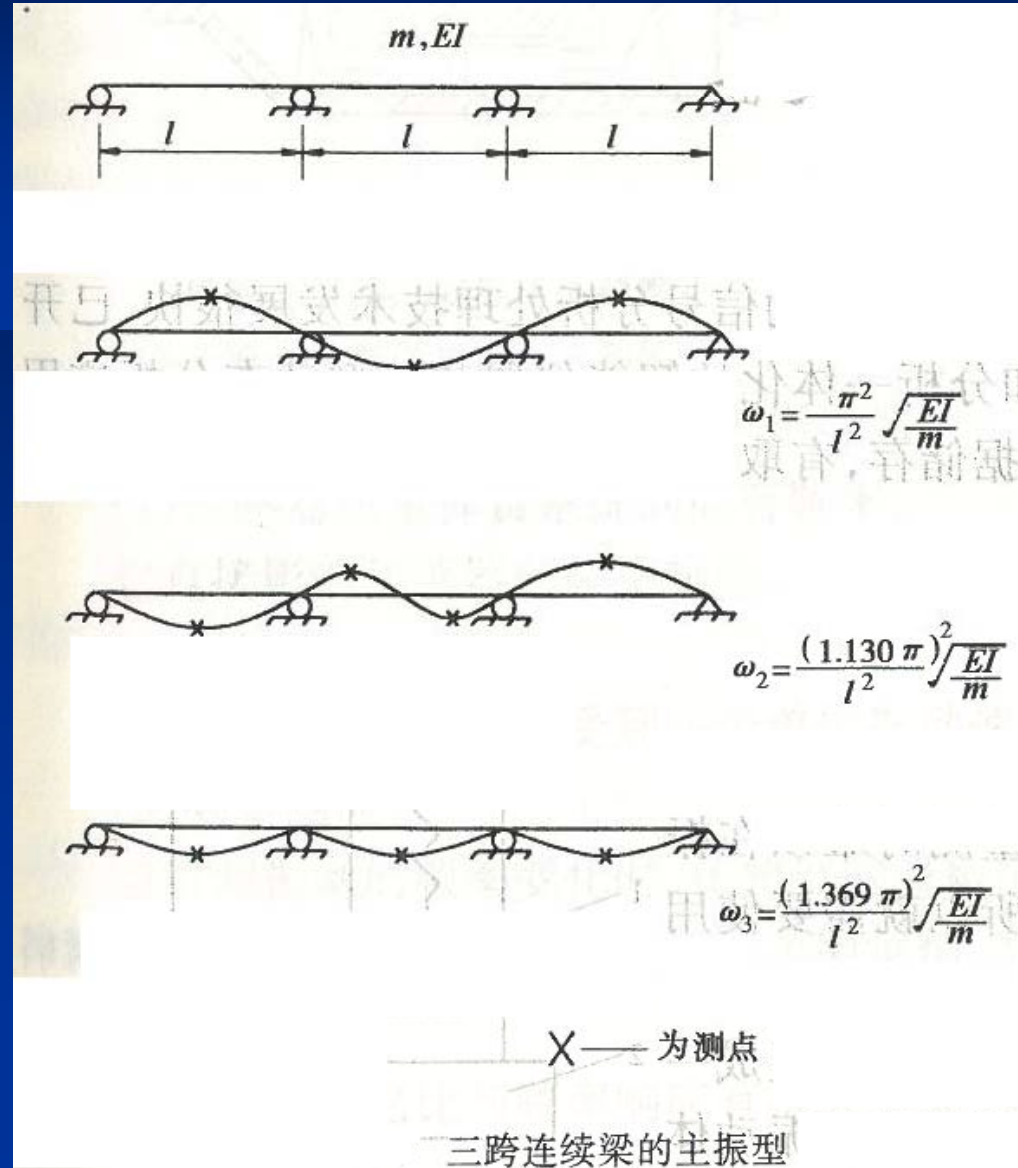
## ■ 悬臂梁的主振型





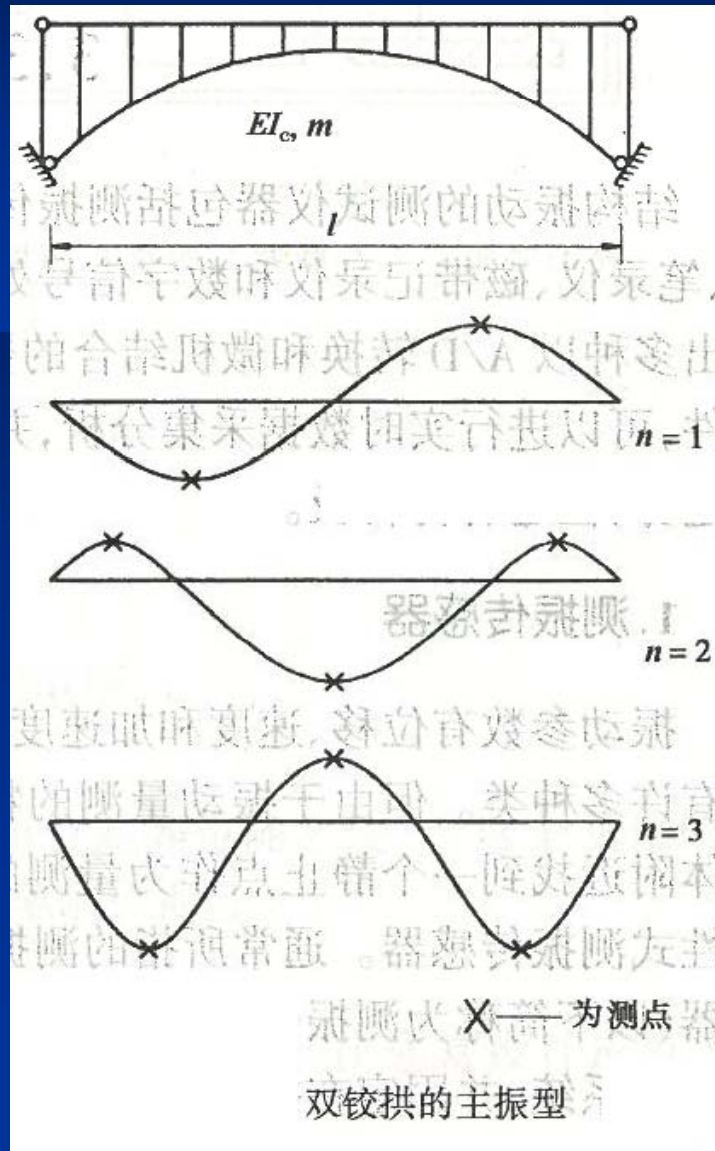
# 桥梁动载试验-桥梁的主振型 (4)

## ■ 三跨连续梁



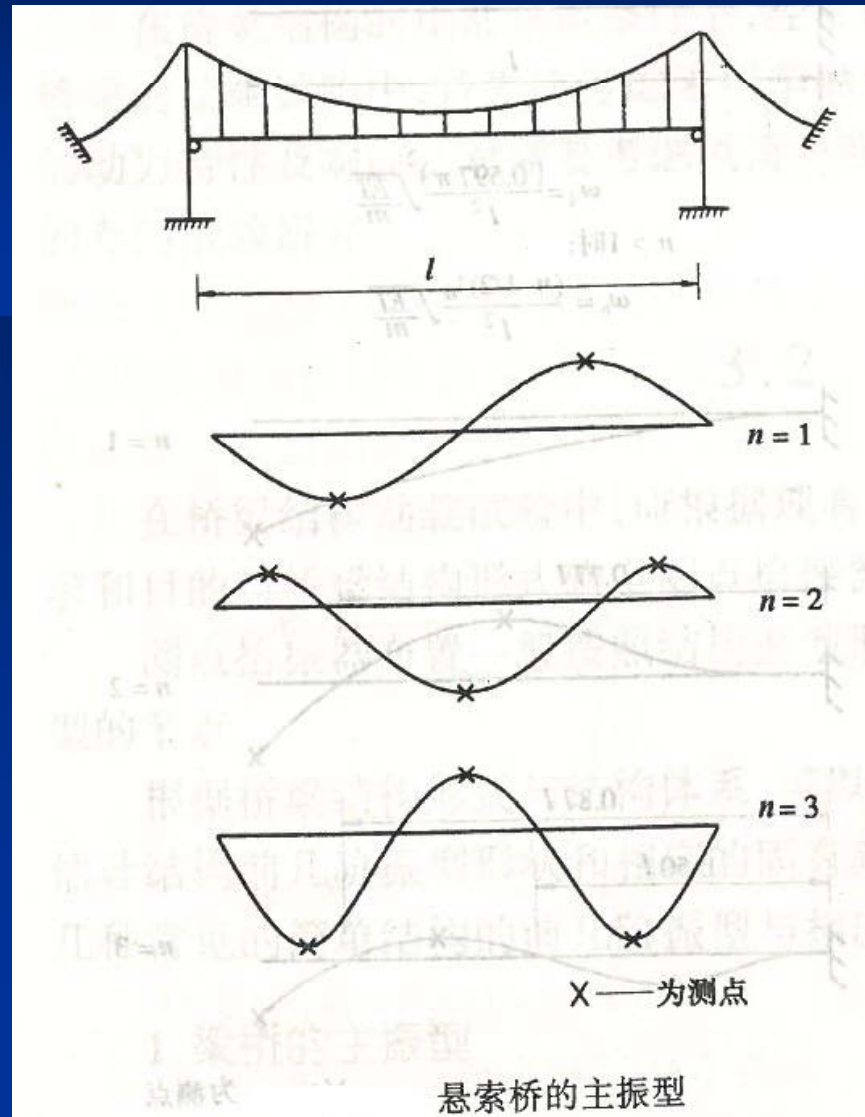
# 桥梁动载试验-桥梁的主振型 (5)

## ■ 双铰拱桥



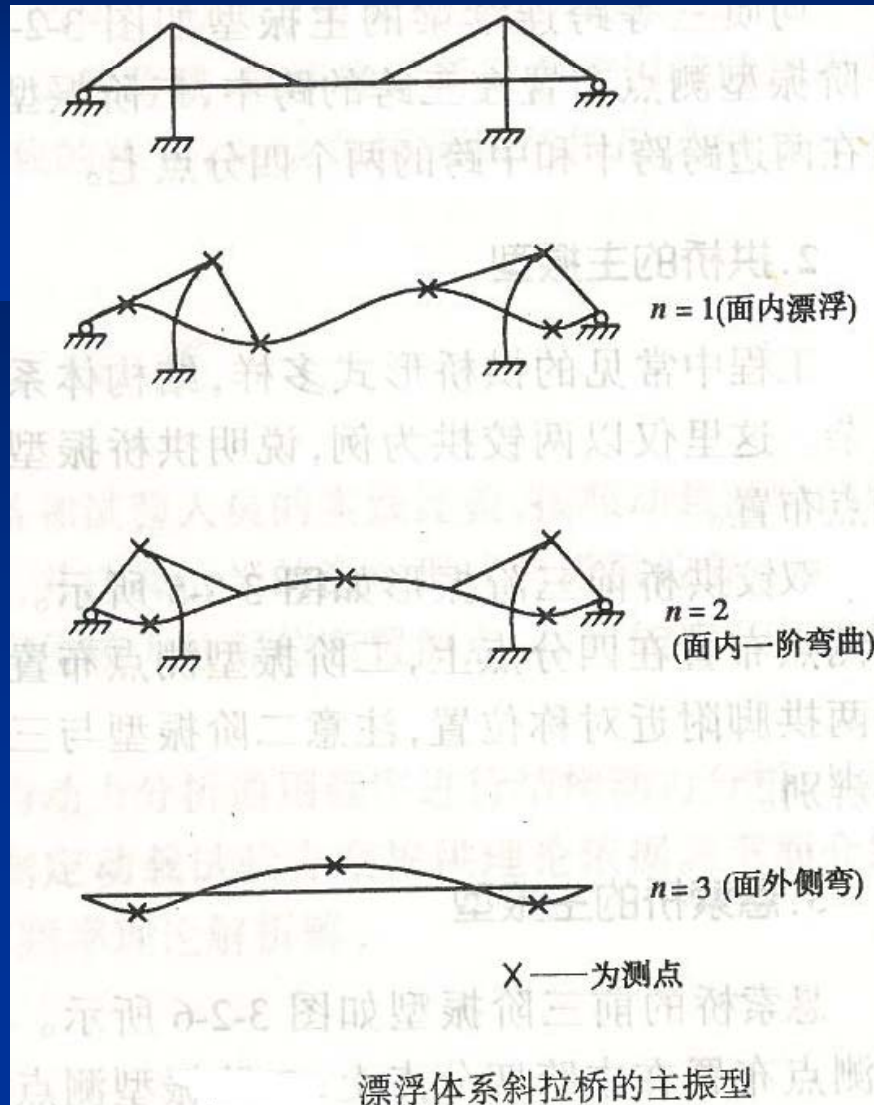
# 桥梁动载试验-桥梁的主振型 (6)

## ■ 悬索桥



# 桥梁动载试验-桥梁的主振型 (7)

## ■ 斜拉桥



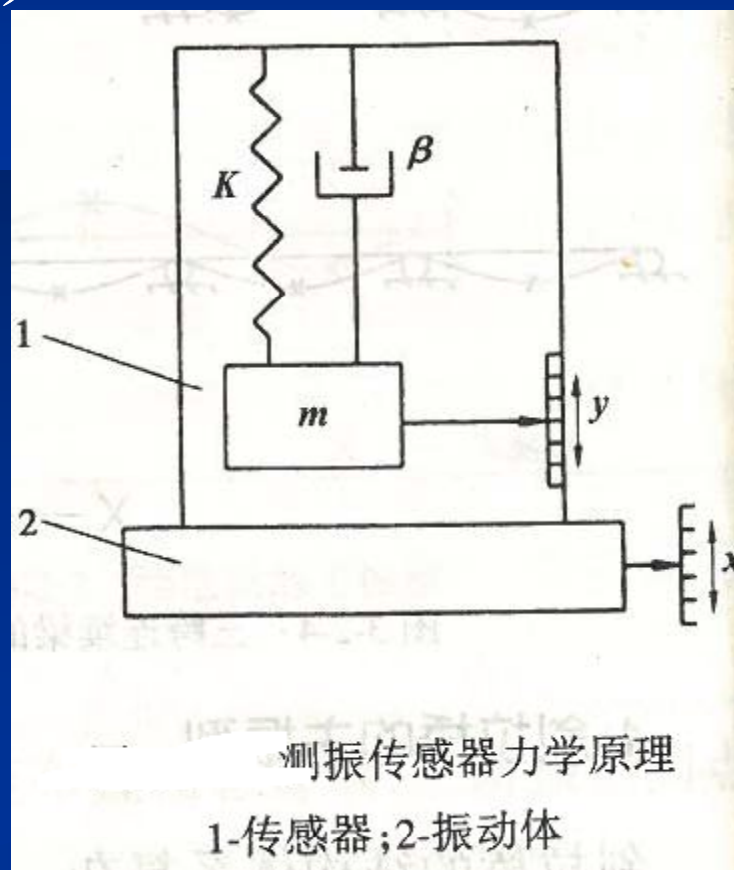
# 桥梁动载试验-测试仪器

- 动测仪器：
  - 测振传感器（拾振器）、信号放大器、动态电阻应变仪、光线示波器、笔记录仪、磁带记录仪、数字信号处理机
  - 仪器（A/D转换、数据采集分析系统）

# 桥梁动载试验-测试仪器

## ■ 测振传感器（拾振器）

■ 测振传感器（惯性式测振传感器，由惯性质量、阻尼和弹簧组成一个动力系统，并固定在振动体上，与振动体一起振动，通过量测惯性质量相对于传感器外壳的振动，就可以得到振动体振动。

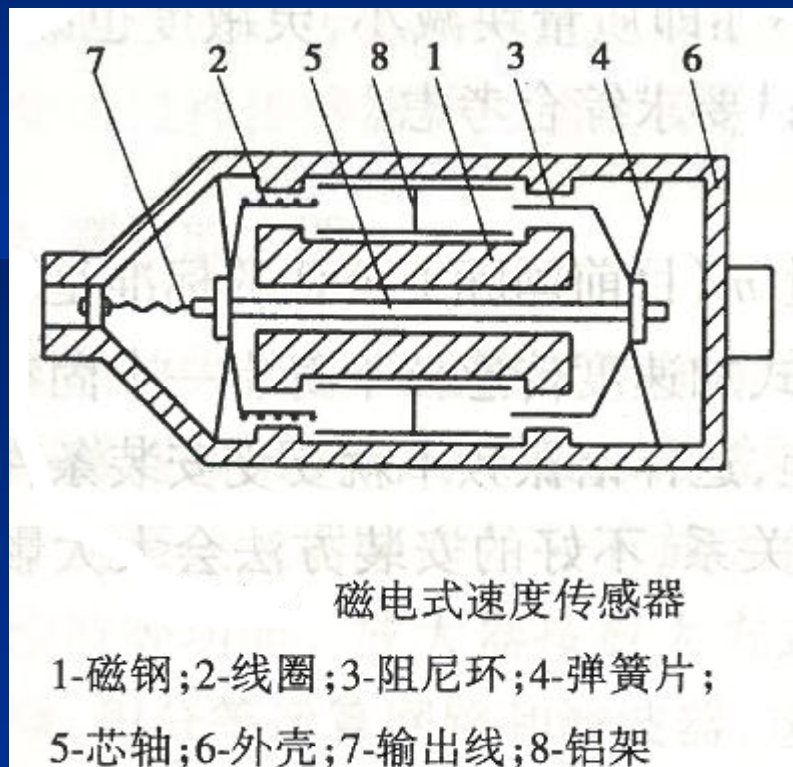


# 桥梁动载试验-测试仪器

- 惯性质量、弹簧和阻尼系统是测振传感器的感受部分。感受到振动信号要通过各种转换方式转换成电信号，转换方式有磁电式、压电式、电阻应变式等
- 传感器所测的的振动量通常是位移、速度和加速度

# 桥梁动载试验-测试仪器

- 磁电式速度传感器
- 电磁感应原理
- 灵敏度高、性能稳定、输出阻抗低、频率响应范围有一定宽度。



- 传感器的电压输出与相对速度成正比



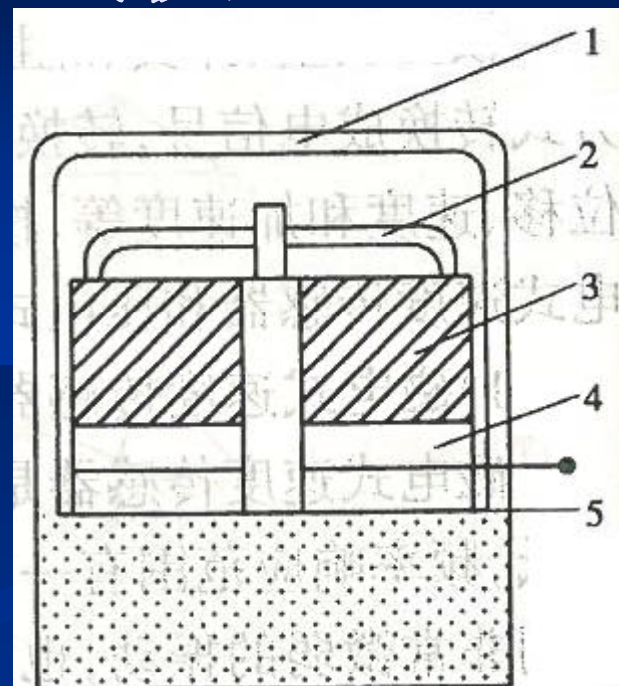
# 桥梁动载试验-测试仪器

## ■ 压电式加速度传感器

### ■ 压电晶

- 体积小、质量小、使用频率范围宽、稳定性与抗干扰性能好。

- 动压力与压电晶体两个表面所产生的电荷量（或电压）成正比



加速度传感器

1-外壳; 2-硬弹簧; 3-质量块;  
4-压电晶体; 5-输出端

# 桥梁动载试验-测试仪器

- 测振放大器

- 放大、二次仪表

- 按照放大方式分2种：

- 1.直接放大形式，并具有微、积分等运算网路和滤波器
- 2.载波放大形式，将输入信号经载波调制后再放大，经过检波解调恢复原波形输出

# 桥梁动载试验-测试仪器

- 测振记录

- 信号处理

# 桥梁动载试验-试验内容

- 跑车试验      动应变、动位移
- 跳车试验      冲击系数
- 刹车试验      自振特性
  
- 脉动试验      自振特性及振型

# 桥梁动载试验-数据处理

## ■ 1、动力试验荷载效率

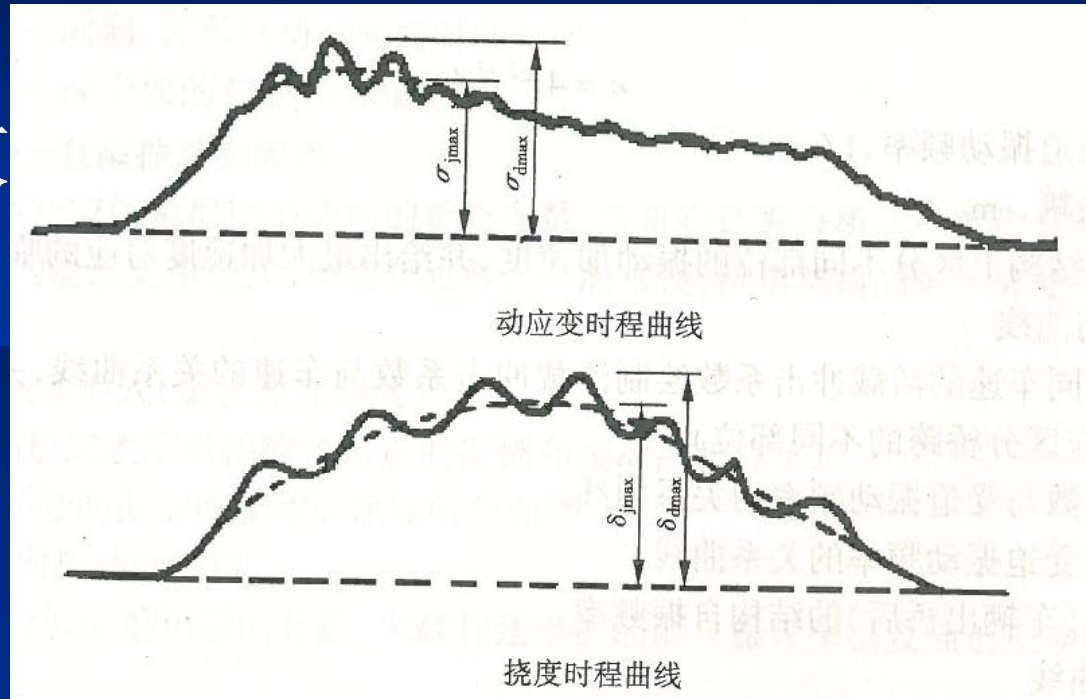
$$\eta_d = \frac{S_d}{S}$$

式中： $S_d$ ——动载试验荷载作用下控制截面最大计算内力值；

$S$ ——标准汽车荷载作用下控制截面最大计算内力值(不计入汽车荷载冲击系数)。

# 桥梁动载试验-数据处理

## ■ 2、活载冲击系数



$$1 + \mu = S_{\max} / S_{\text{mean}}$$

式中： $S_{\max}$ ——荷载作用下该测点最大应变(或挠度)值,即最大波峰值;

$S_{\text{mean}}$ ——相应的静载作用下该测点最大应变(或挠度)值(可取本次波形的振幅中心轨迹线的顶点值)。

$$S_{\text{mean}} = (S_{\max} + S_{\min}) / 2$$

其中  $S_{\min}$  为与  $S_{\text{mean}}$  对应的最小应变(或挠度)值(即同周期的波谷值)。

# 桥梁动载试验-数据处理

## ■ 2、活载冲击系数

同一桥梁不同部位的冲击系数是不同的。一般情况下,梁桥给出跨中和支点部位的冲击系数;斜拉桥和悬索桥给出吊点和加劲梁节段中点部位的冲击系数;而钢桁梁桥应区别弦杆、腹杆、纵梁、横梁分别给出冲击系数。

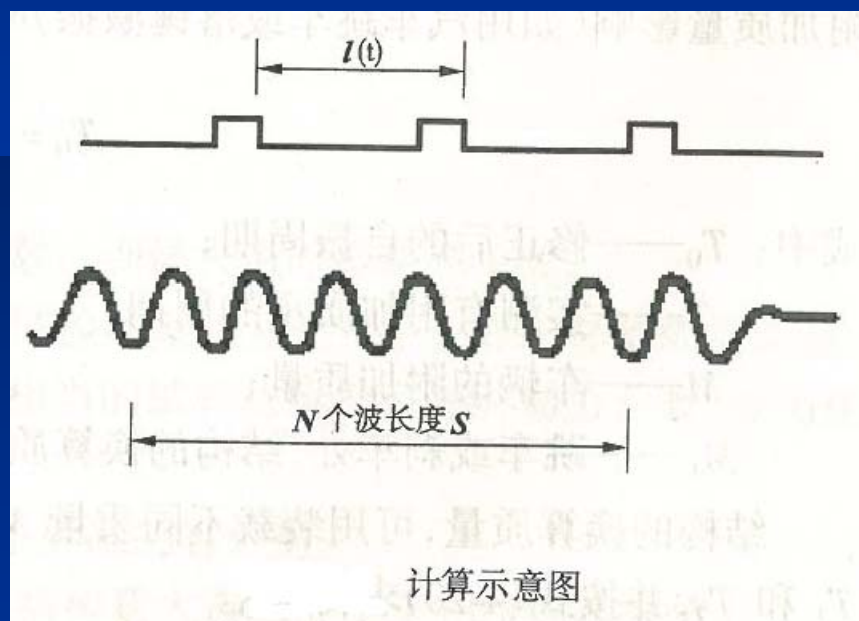
# 桥梁动载试验-数据处理

- 3、结构振动（不同车速引起）的频率、振幅、加速度

频率

$$f = \frac{l}{t} \cdot \frac{N}{S}$$

式中： $l$ ——两时刻间的距离，mm；  
 $t$ ——两时刻间的时间间隔，s；  
 $N$ ——波形数；  
 $S$ —— $N$ 个波的长度，m。





# 桥梁动载试验-数据处理

- 3、结构振动（不同车速引起）的频率、振幅、加速度

加速度表示车辆运行的安全程度和乘客的舒适度。

$$a = 4\pi^2 f^2 A$$

式中： $f$ ——强迫振动频率，1/s；  
 $A$ ——振幅，cm。

# 桥梁动载试验-数据处理

## ■ 4、振型曲线

布置拾振器

各个测点处的振幅和相位差

前三阶振型

# 桥梁动载试验-数据处理

## ■ 5、阻尼特性

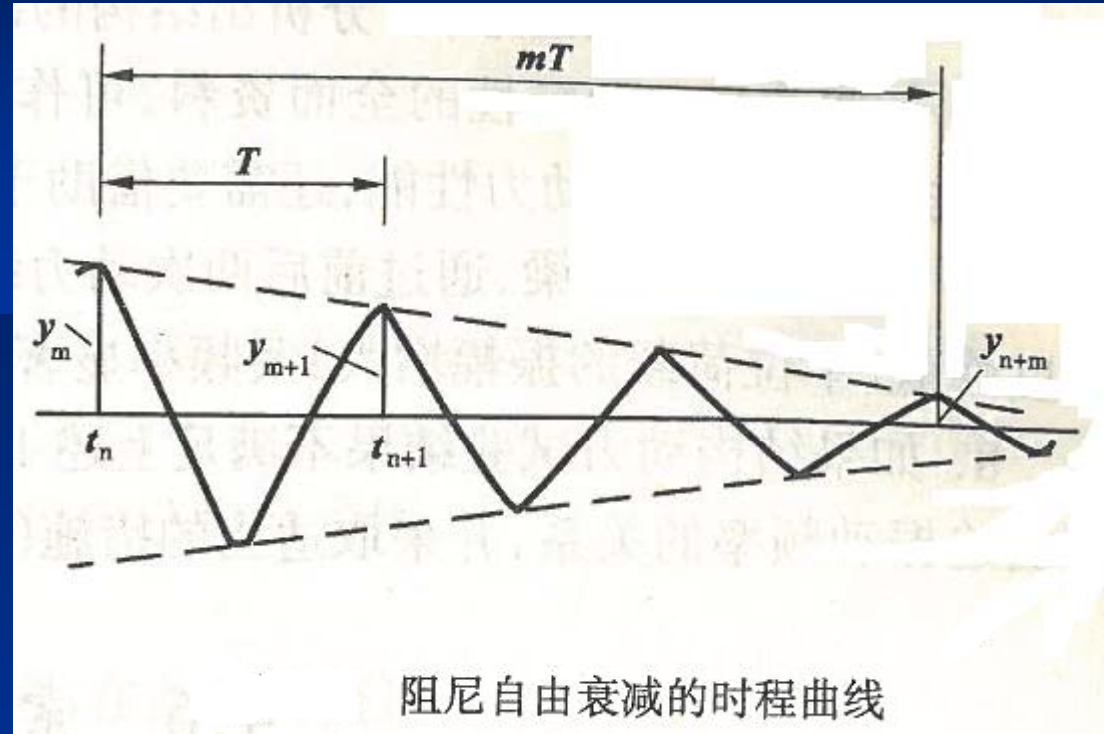
### 自由衰减振动

阻尼特性系数

$$\nu = \frac{1}{mT} \ln \frac{y_n}{y_{n+m}}$$

平均阻尼比  $\xi$ :

$$\xi = \frac{\nu}{\omega} = \frac{1}{2\pi m} \ln \frac{y_n}{y_{n+m}}$$



上述式中： $m$ ——振幅  $y_n \sim y_{n+m}$  之间波形数；  
 $T$ ——周期，波形振动一周的时间，s；  
 $y_n \sim y_{n+m}$ —— $m$  个波的初始和终结振幅；  
 $\omega$ ——衰减振动圆频率。

# 桥梁动载试验-数据处理

## ■ 5、阻尼特性

产生阻尼的原因：材料的内阻尼、结构构造及支座型式、环境介质等

一般来说，桥梁结构的阻尼值很难计算，只能通过实测获得。

# 桥梁动载试验-结果评定

- 1、比较桥梁结构频率的理论值与实测值
- 2、根据动力冲击系数的实测值来评价桥梁结构的行车性能
- 3、实测阻尼比的大小反映了桥梁结构耗散外部能量输入的能力

# 桥梁动载试验-索力测量

- 大跨度悬吊结构，拉索（缆索）或吊杆

施工阶段

成桥时

运营时期

# 桥梁动载试验-索力测量

## ■ 常用索力测量的方法

1. 电阻应变片测定；
2. 缆索伸长量测定；
3. 荷载传感器测定；
4. 张拉千斤顶测定；
5. 压力型油压千斤顶测定；
6. 主梁线形测定；
7. 缆索垂度测定；
8. 人工激振测定；
9. 脉动法测定。

# 桥梁动载试验-索力测量

## ■ 原理

不考虑缆索抗弯刚度

不计算抗弯刚度的拉索的振动微分方程为：

$$\frac{W\partial^2 y}{g\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

$$T = \frac{4Wl^2}{g} \left( \frac{f_n}{n} \right)^2$$



# 桥梁动载试验-索力测量

## ■ 原理

考虑抗弯刚度后索的自由振动微分方程为

$$\frac{W\partial^2 y}{g\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

假定索的边界条件为两端铰接,可由式(4-27)解得索拉力为:

$$T = \frac{4Wl^2}{g} \left( \frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{n^2 EI \pi^2}{l^2}$$

另外计入缆索自重时,可解得索下端的拉力:

$$T = \frac{4Wl^2}{g} \left( \frac{f_n}{n} \right)^2 + \frac{2Wl^2}{g} \left( \frac{f_n}{n} \right)^2 \sqrt{1 - \frac{n^2 g^2 \sin^2 \alpha}{16l^2 f_n \pi^2}}$$

# 桥梁动载试验-索力测量

## ■ 索力测试系统



# 桥梁动载试验-桩基动力检测

## ■ 桥梁桩基动力检测

桥梁桩基动力检测包含以下两方面内容：

### 1. 桩身完整性检测

其内容包括检测桩身经常存在的缺陷如夹泥、断桩、缩颈、扩颈、混凝土离析、混凝土密实性较差等；以及桩底支承条件质量问题如清孔不彻底、桩底沉积厚度超标等。桩基完整性动力检测通常采用低应变检测手段，如反射波法、机械阻抗法、水电效应法、声波透射法等。本节仅涉及工程中最常用的低应变反射波法的原理及其应用。

### 2. 承载力检测

主要检测桩基的实际承载能力。目前桩基承载力动力检测采用的方法有两种，即 CASE 法和 CAPWAP 法。CASE 法已具有了一套完整的计算公式和高精度的现场检测及实时分析设备，在工程中得以广泛应用。