

桥梁结构实验指导书

（土木水利学院土木工程专业桥梁方向本科生适用）

大连理工大学土木水利实验教学中心

桥梁工程实验室

2010 年9 月

桥梁实验 1—桥梁结构静态机械式仪表测试

（一）实验概况：

为了使桥梁设计更合理经济耐用在设计中进行模型实验是非常必要的。在桥梁结构实验，需要测量的内容是多种多样的，如外力、变形、挠度、转角、曲率、几何变形等等。目前采用静力实验仪表也是比较多的。常用的机械仪表：有百分表、千分表双杠引伸仪、手持应变仪、刚弦计、倾角仪等。

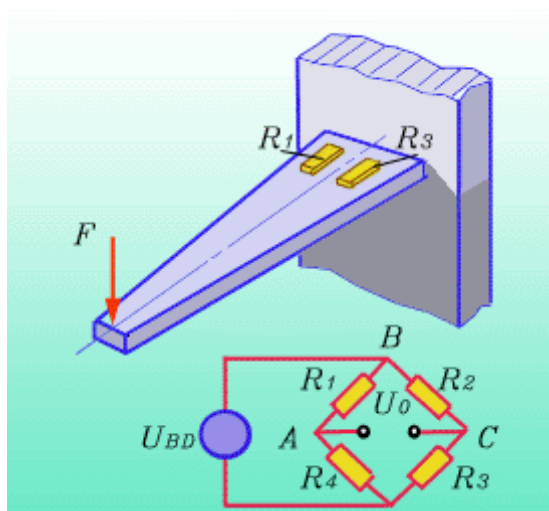
（二）实验目的：

1. 使学生掌握机械仪表用途、使用方法和种类等。
2. 使学生掌握各种仪表使用范围及精度等。
3. 通过桥梁的模型实验加深理论与实践关系，加强桥梁实验重要性和必要性。
4. 增加学生理论与实践相结合的认识。

（三）实验内容：

1. 等强度梁的应变

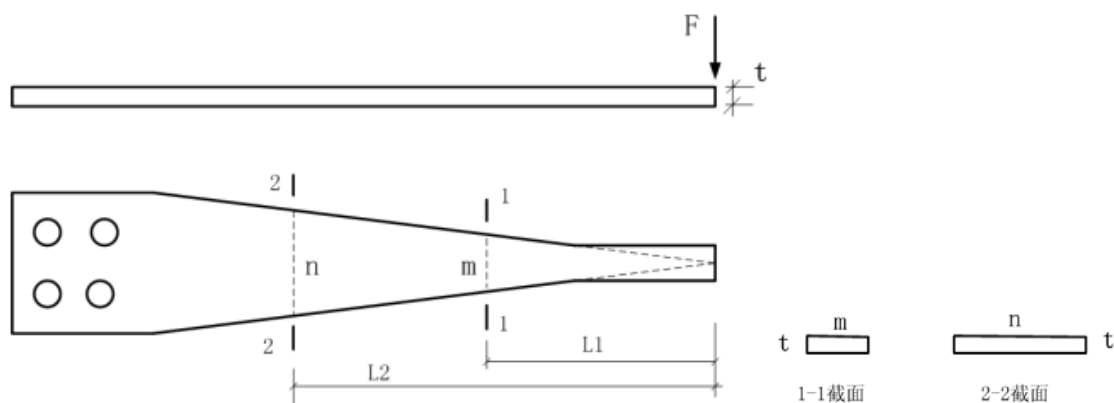
等强度梁：为了使各个截面的弯曲应力相同,则应随着弯矩的大小相应地改变截面尺寸,以保持相同强度的梁,这种梁称为等强度梁



等强度梁如左图(等强度梁式力传感器)所示，梁厚为 h ，梁长为 l ，固定端宽为 b_0 ，自由端宽为 b 。梁的截面成等腰三角形，集中力 F 作用在三角形顶点。梁内各横截面产生的应力是相等的，表面上任意位置的应变也相等，因此称为等强度梁，其应变为

$$\delta = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fl}{b_0 h^3 E}$$

2. 等强度梁的应力



1-1 截面和 2-2 截面应力为：

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{w_1} = \frac{F \cdot L_1}{w_1} \quad \sigma_2 = \frac{M_2}{w_2} = \frac{F \cdot L_2}{w_2}$$

1-1 截面和 2-2 截面抗弯截面模量：

$$w_1 = \frac{I_1}{t/2} = \frac{\frac{m \cdot t^3}{12}}{t/2} = \frac{m \cdot t^2}{6} \quad w_2 = \frac{I_2}{t/2} = \frac{\frac{n \cdot t^3}{12}}{t/2} = \frac{n \cdot t^2}{6}$$

计算两截面的应力为

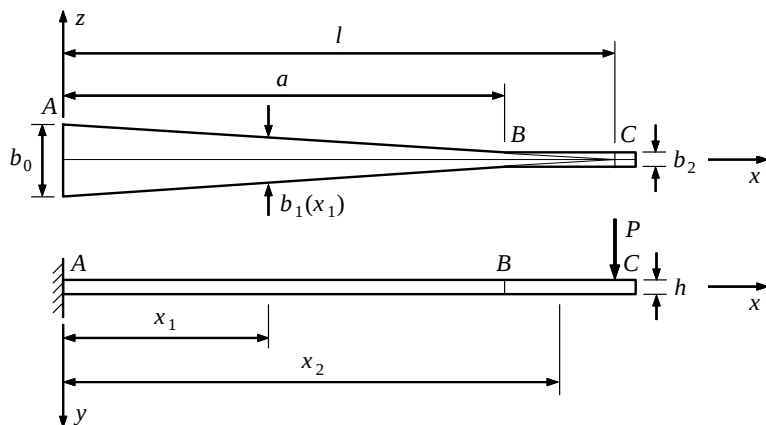
$$\sigma_1 = \frac{6F \cdot L_1}{m \cdot t^2} \quad \sigma_2 = \frac{6F \cdot L_2}{n \cdot t^2}$$

所以等强度梁两截面应力相同： $\sigma_1 = \sigma_2$

3. 等强度梁的挠度

对下图所示的等强度梁，有如下关系

$$\frac{b_0}{b_2} = \frac{l}{l-a} \quad (1)$$



等强度梁的挠度计算

等强度梁段 AB 的横截面 A 对中性轴 z 的惯性矩 I_0 和等截面梁段 BC 的横截面对中性轴 z 的惯性矩 I_2 分别为

$$I_0 = \frac{b_0 h^3}{12}, \quad I_2 = \frac{b_2 h^3}{12} \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可得

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{b_0}{b_2} = \frac{l}{l-a} \quad (3)$$

对 AB 段 ($0 \leq x_1 \leq a$)，梁在 x_1 截面处的宽度、对中性轴 z 的惯性矩和弯矩分别为

$$\begin{aligned} b_1(x_1) &= \frac{b_0(l-x_1)}{l} \\ I_1(x_1) &= \frac{b_1(x_1)h^3}{12} = I_0 \frac{l-x_1}{l} \\ M_1(x_1) &= -P(l-x_1) \end{aligned} \quad (4)$$

梁的挠曲线近似微分方程为

$$y_1'' = -\frac{M_1(x_1)}{EI_1(x_1)} = \frac{Pl}{EI_0} \quad (5)$$

积分两次得到

$$\begin{aligned} y_1' &= \frac{Pl}{EI_0} x_1 + C_1 \\ y_1 &= \frac{Pl}{2EI_0} x_1^2 + C_1 x_1 + D_1 \end{aligned} \quad (6)$$

利用边界条件 $y_1(0) = y_1'(0) = 0$ ，可以得到 $C_1 = D_1 = 0$ ，故梁在 AB 段的挠曲线方程和转角方程分别为

$$y_1 = \frac{Pl}{2EI_0} x_1^2$$

$$\theta_1 = y_1' = \frac{Pl}{EI_0} x_1 \quad (7)$$

对 BC 段 ($a \leq x_2 \leq l$)，梁在 x_2 截面处的弯矩为

$$M_2(x_2) = -P(l - x_2) \quad (8)$$

梁的挠曲线近似微分方程为

$$y_2'' = -\frac{M_2(x_2)}{EI_2} = \frac{P}{EI_2}(l - x_2) \quad (9)$$

积分两次得到

$$y_2' = -\frac{P}{2EI_2}(l - x_2)^2 + C_2$$

$$y_2 = \frac{P}{6EI_2}(l - x_2)^3 - C_2(l - x_2) + D_2 \quad (10)$$

利用边界条件 $y_2'(a) = y_1'(a)$ 、 $y_2(a) = y_1(a)$ 以及 (3) 式，可以得到

$$C_2 = \frac{P(l^2 - a^2)}{2EI_2}, \quad D_2 = \frac{P(l - a)[3l^2 - (l - a)^2]}{6EI_2} \quad (11)$$

故梁在 BC 段的挠曲线方程为

$$y_2 = \frac{P}{6EI_2} \left\{ (l - x_2)^3 - 3(l^2 - a^2)(l - x_2) + (l - a)[3l^2 - (l - a)^2] \right\} \quad (12)$$

BC 段的挠曲线方程也可用叠加法求解。 B 截面的挠度和转角分别为

$$y_B = y_1(a) = \frac{Pla^2}{2EI_0}$$

$$\theta_B = \theta_1(a) = \frac{Pla}{EI_0} \quad (13)$$

根据叠加法，有

$$y_2 = y_B + \theta_B(x_2 - a) + \frac{P}{6EI_2}(x_2 - a)^2[3(l - a) - (x_2 - a)] \quad (14)$$

将 (13) 式代入上式，得到梁在 BC 段的挠曲线方程为

$$y_2 = \frac{P}{6EI_2} \left[(x_2 - a)^2(3l - 2a - x_2) + 3a(l - a)(2x_2 - a) \right] \quad (15)$$

4. 根据等强度梁的基本尺寸和加荷大小计算出有关力学性能

基本尺寸：

跨度 $l = 36cm$ 梁高 $h = 1.2cm$

梁宽度 $b = 10.2cm$ 梁的弹性模量 $E = 3.0 \times 10^4 kg/cm^2$

荷载 $P = 2kg$ （注基本尺寸要求同学自己量出）

a. 计算出

应力 $\sigma = ?$

挠度 $f_c = ?$

b. 进行加荷实验

分四个工况

1 kg、2 kg、3 kg、4 kg

相应测出：千分表读数和百分表挠度读数

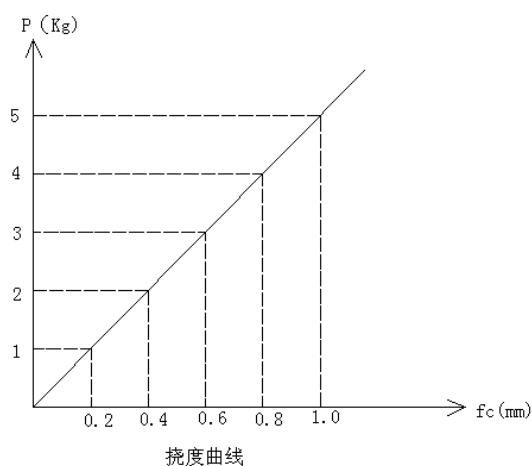
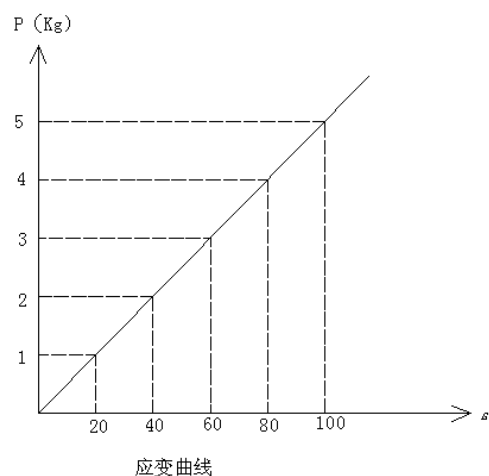
$$\text{即 } \varepsilon = \frac{\text{千分表读数} \times 0.001}{\text{标距}(\text{mm})} \times \frac{1}{K} \quad \text{——为纯弯曲部位应变}$$

注：因为千分表布点不在梁的一个平面，故产生角位移。因此计算结果偏大，除以 K 即为梁的应变。

5. 测试结果整理和对比

(1) 画出每级荷载应变曲线

(2) 画出每级荷载挠度曲线



6. 实验结果分析与误差分析

桥梁实验 2—桥梁结构静态电子式仪表测试

（一）电测技术：

1. 电测技术概况

随着国民经济发展对桥梁结构实验的要求，越来越被有关技术工作者关注。因此桥梁现场实验也越来越多用电测仪器。

2. 电测原理

是把非电量测试变成电量测量，比如构件受外作用拉或压不存在电量问题、它可以通过传感器（电阻片）把非电传导变成电信号测量。

物理公式： $R = \rho \frac{l}{A}$

R —为电阻

l —为标距

A —为电阻丝断面积

3. 电测技术优点与缺点

- （1）精度高（比机械而言），最高精度可达 $1\mu\varepsilon$ 即 1×10^{-6} 。
- （2）可远程操作，同时速度快，可做到自测自记特点。
- （3）可以多点测量，省人力方便等、可连续记录减少时间。
- （4）缺点要求有专门技术人员，对场地要求，不能在有高磁场和电感的地方测试。

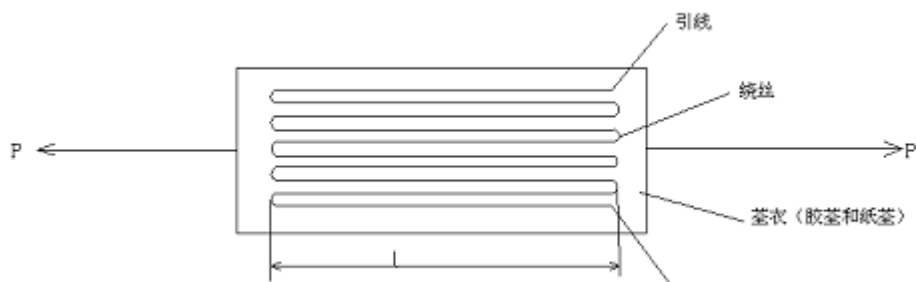
4. 使用电测试原理与种类

原理：利用电桥原理，即对边相乘相等。

种类：a. 纸荃 b. 胶荃 c. 大标距与小标距 d. 绕丝与矩接
e. 高温片、常温片、低温片 f. 断裂电阻片

5. 电桥与桥路连接法

- （1）电测原理：把非电测量变成电量测量



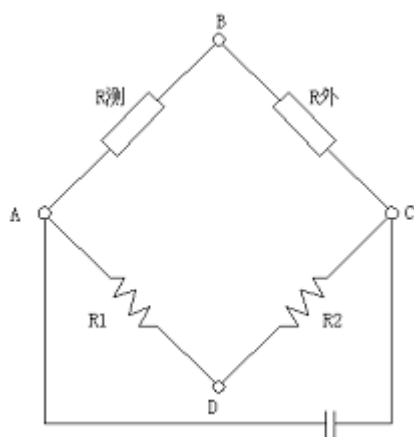
物理公式: $R = \rho \frac{l}{F}$ $F = \frac{\pi d^2}{4}$

R — 电阻值 ρ — 电阻系数

d — 电阻丝标距 F — 电阻丝断面积

本来电阻片受外力拉没有点的信号，但是通过控制而使电阻丝断面发生变化从而使电阻发生变化，因此原因电非电测转化为电信号变化。

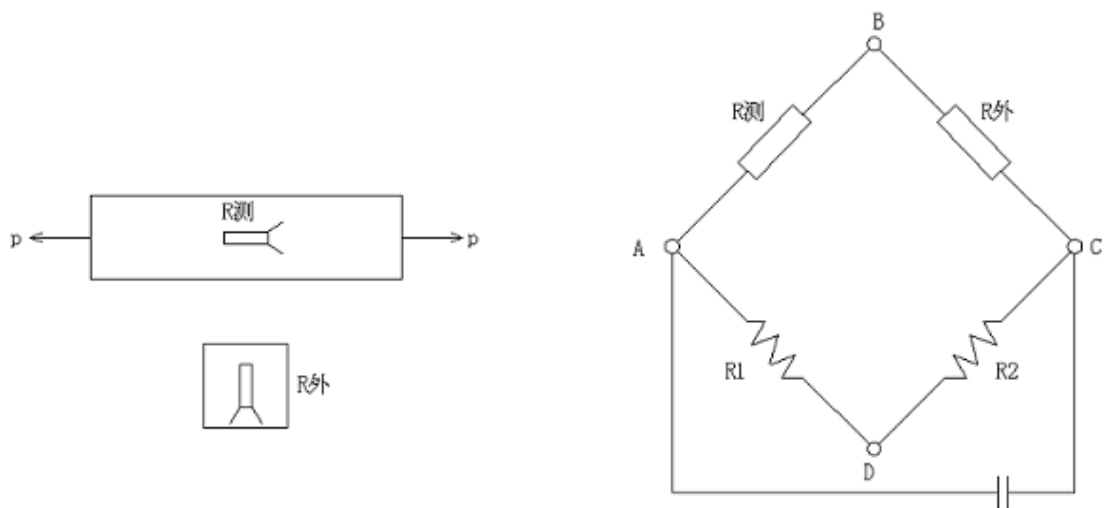
(2) 电桥原理：对边相乘相等



$$R_{\text{测}} \cdot R_2 = R_{\text{外}} \cdot R_1$$

(3) 桥路接法（半桥）

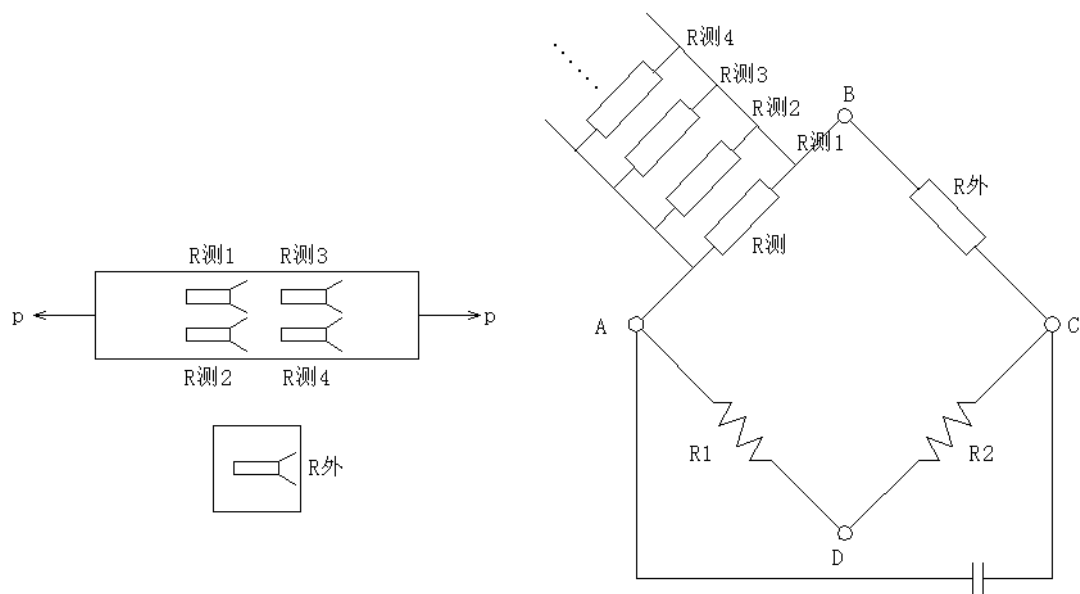
a. 半桥单点接法



$$R_{\text{测}} \cdot R_2 = R_{\text{外}} \cdot R_1$$

$$\varepsilon_{\text{仪}} = \varepsilon_{\text{实}}$$

b. 半桥多点接法

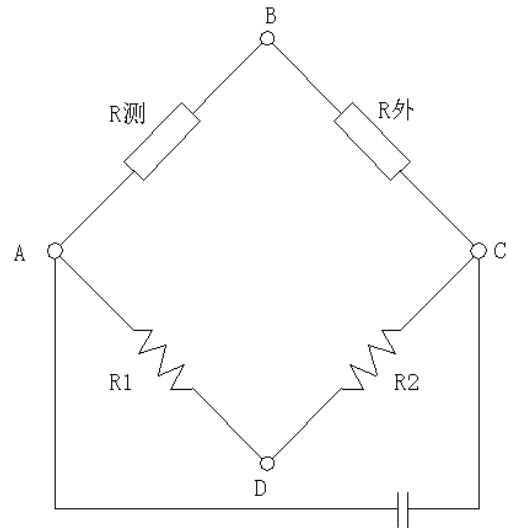
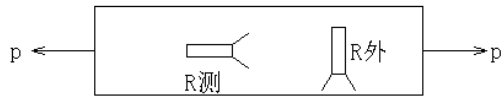


$$R_{\text{测}} \cdot R_2 = R_{\text{外}} \cdot R_1$$

$$\varepsilon_{\text{仪}} = \varepsilon_{\text{实}}$$

注：可以分点开关分别测出 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ……即可。

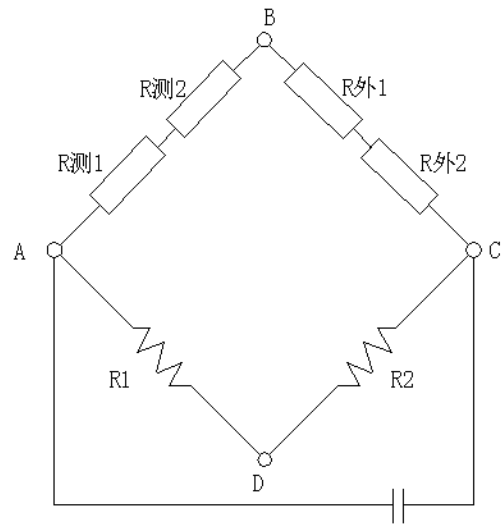
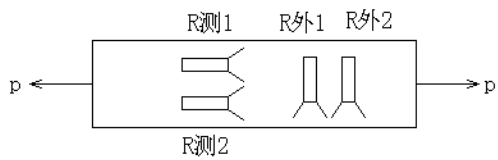
c. 半桥改模向效应接法



$$R_{\text{测}} \cdot R_2 = R_{\text{外}} \cdot R_1$$

$$\varepsilon_{\text{仪}} = (1 + \mu) \varepsilon_{\text{实}}$$

d. 双片半桥接法

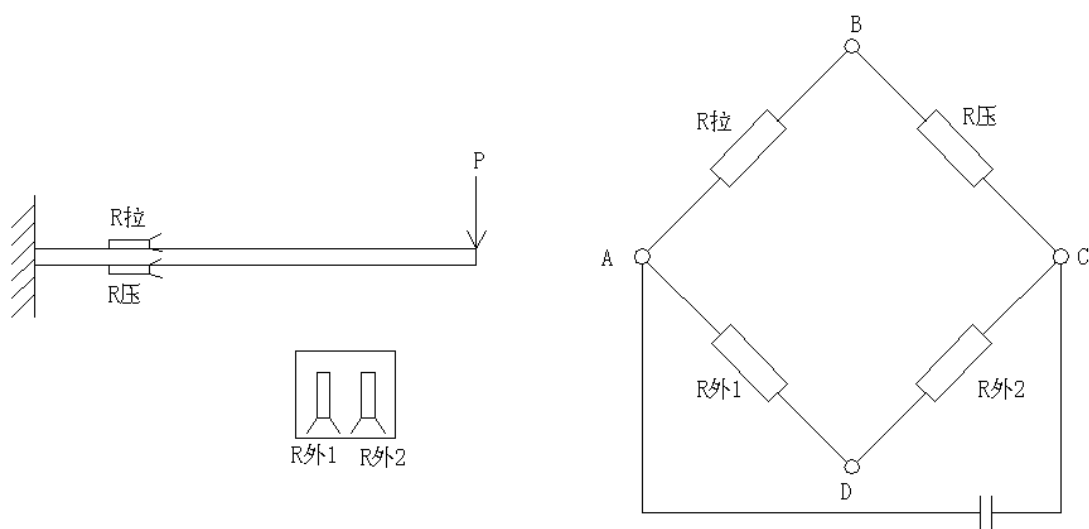


$$R_{\text{测}1} \cdot R_{\text{测}2} \cdot R_2 = R_{\text{外}1} \cdot R_{\text{外}2} \cdot R_1$$

$$\varepsilon_{\text{仪}} = 2(1 + \mu) \varepsilon_{\text{实}}$$

(4) 全桥接法

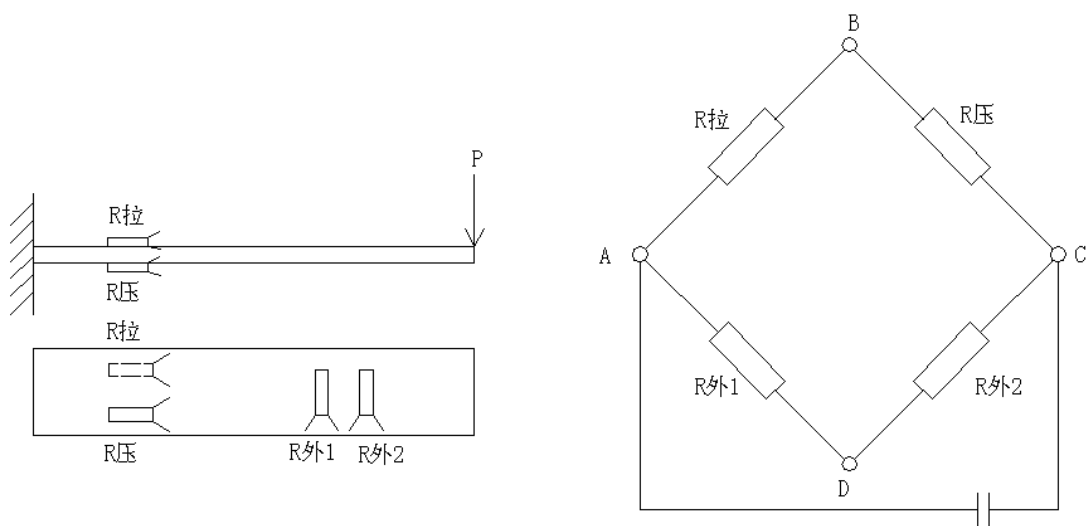
e. 拉压片接法



$$R_{拉} \cdot R_{补2} = R_{压} \cdot R_{补1}$$

$$\varepsilon_{仪} = 2\varepsilon_{实}$$

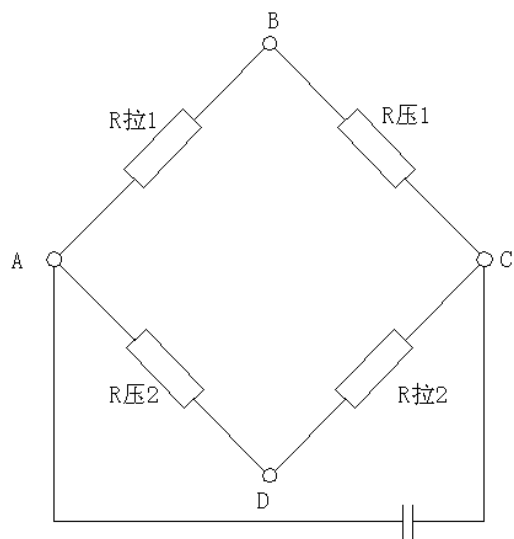
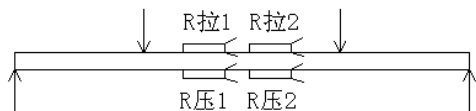
f. 拉压考虑横向效应接法



$$R_{拉} \cdot R_{补2} = R_{压} \cdot R_{补1}$$

$$\varepsilon_{仪} = 2(1 + \mu)\varepsilon_{实}$$

g. 双片全桥接法

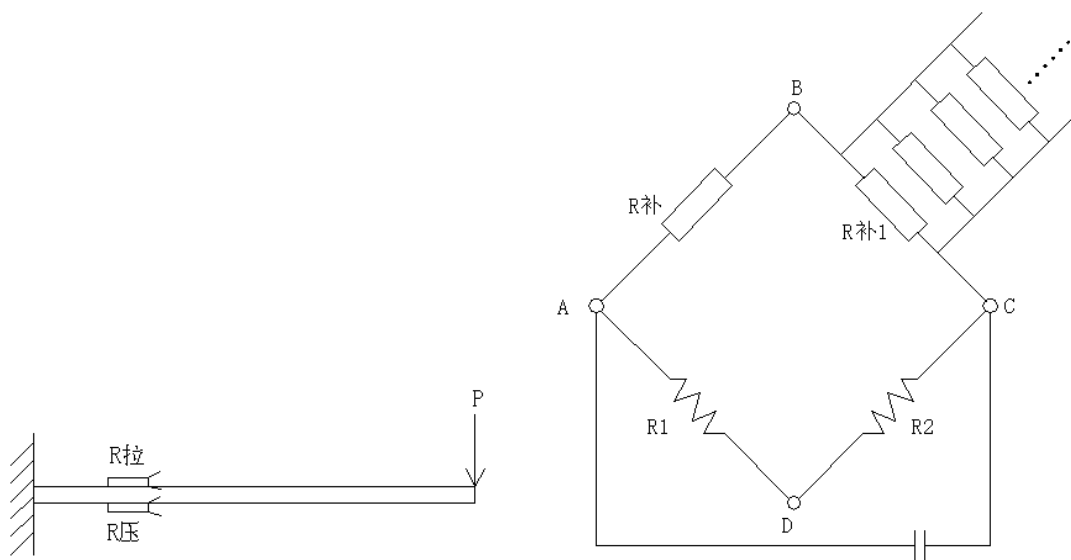


$$R_{拉1} \cdot R_{拉2} = R_{压1} \cdot R_{压2}$$

$$\varepsilon_{仪} = 4\varepsilon_{实}$$

(5) 本实验线路接法

h. 多点单片接法（半桥）

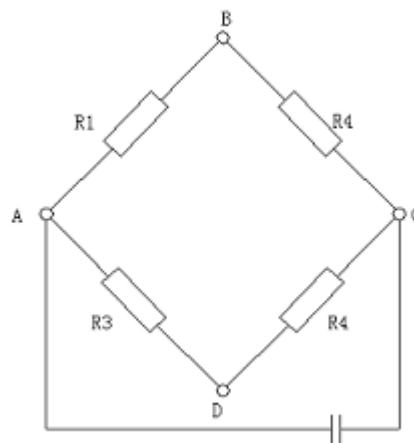


$$R_{补1} \cdot R1 = R_{补} \cdot R2$$

分别测 $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ 、 $R4$ 电阻应变。可按多点测量办法。

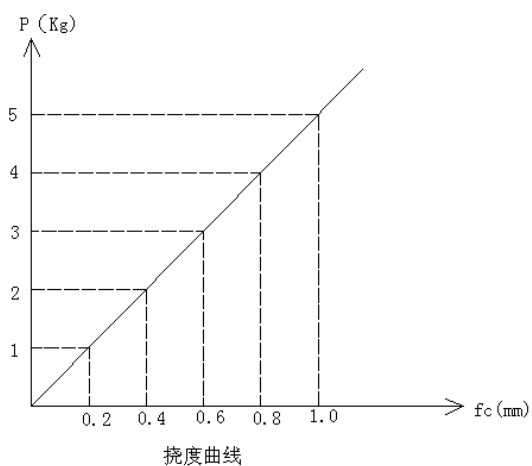
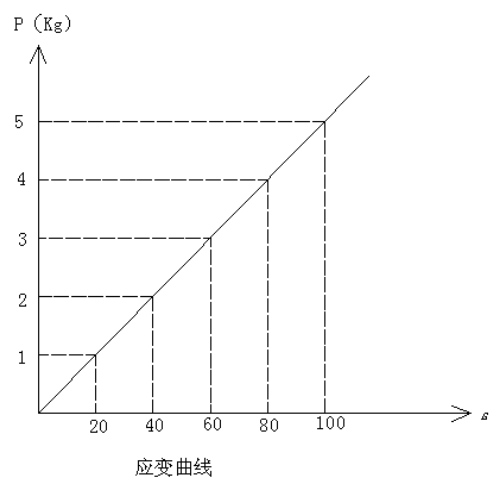
i. 多点片接全桥接法

$\varepsilon_{\text{仪}} \div 4 = \text{真实应变}$
 这种方法实际等于把原来法放大4倍。



(二) 测试结果整理和对比

1. 画出每级荷载应变曲线
2. 画出每级荷载挠度曲线



(三) 结果对比分析

$$\varepsilon' =$$

$$f_c^j =$$

$$\varepsilon_{\text{电}} =$$

$$f_c^s =$$

$$\text{应变误差} = \frac{\varepsilon' - \varepsilon_{\text{电}}}{\varepsilon_j} \%$$

$$\text{应变误差} = \frac{f_c^j - f_{\text{实}}}{f_c^j} \%$$

桥梁实验 3-桥梁结构动态测试（1）

1. 概况

各种建筑结构由于结构本身功能特点，随着地区和生产工艺、操作技术等方面各种要求，使结构在使用中，除了承受静载作用外，还承受各种动载作用，如何正确认识动荷载作用，因此在工程中就产生振动问题。为减少它给生产和生活带来的影响。这是建筑工程中急需研究和解决的问题，动荷使用范围归纳起来大致有以下几个方面。

（1）如何预防预报地震。我国是个地震国家，设计中按震度 7^0 μs 上对结构设防为防震结构依据，必须采用动态实验。

（2）对特殊结构如机械设备中锻锤、水压机、气压机、风机、发电机等但都产生振动与冲击影响。为保证厂房安全使用对结构物必须做动态实验，为实验提供依据。

（3）高层建筑物电视塔、输油线、架空塔架、烟囱，要考虑在设计中侧风荷对建筑物引起振动影响。

建筑结构动力特性是反映结构本身所固有的动力性能。它的主要内容包括结构的自振频率、阻尼系数和振型等一些基本参数，也称动力特性参数或振动模态参数。这些特性是由结构形式、质量分布、结构刚度、材料性质，构造连接等因素决定，但与外荷载无关。

建筑结构动力特性实验量测结构动力特性参数是结构动力实验的基本内容，在研究建筑结构或其他工程结构的抗震、抗风或抗御其它动荷载的性能和能力时，都必须要进行结构动力特性实验，了解结构的自振特性。

动态测试的必要性

1. 在结构抗震设计中，为了确定地震作用的大小，必须了解各类结构的自振周期。同样，对于已建建筑的震后加固修复，也需了解结构的动力特性，建立结构的动力计算模型，才能进行地震反应分析。

2. 测量结构动力特性，了解结构的自振频率，可以避免和防止动荷载作用所产生的干扰与结构产生共振或拍振现象。在设计中可以使结构避开干扰源的影响，同样也可以设法防止结构自身动力特性对于仪器设备的工作产生干扰的影响，可以帮助寻找采取相应的措施进行防震，隔震或消震。

3. 结构动力特性实验可以为检测、诊断结构的损伤积累提供可靠的资料和数据。由于结构受动力作用，特别是地震作用后，结构受损开裂使结构刚度发生

变化，刚度的减弱使结构自振周期变长，阻尼变大。由此，可以从结构自身固有特性的变化来识别结构物的损伤程度，为结构的可靠度诊断和剩余寿命的估计提供依据。

2. 动载实验目的

- (1) 了解动态测量的手段和办法及有关动测系统的原理方法和操作规程。
- (2) 如何通过拾振器、放大器、波形记录器测出建筑物自振频率。

3. 实验内容

- (1) 测记简支梁自振频率曲线和加速度曲线
- (2) 计算简支梁自振特性参数

根据公式可以算出下列物理量

$$\text{周期: } T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\text{频率: } f = \frac{1}{T}$$

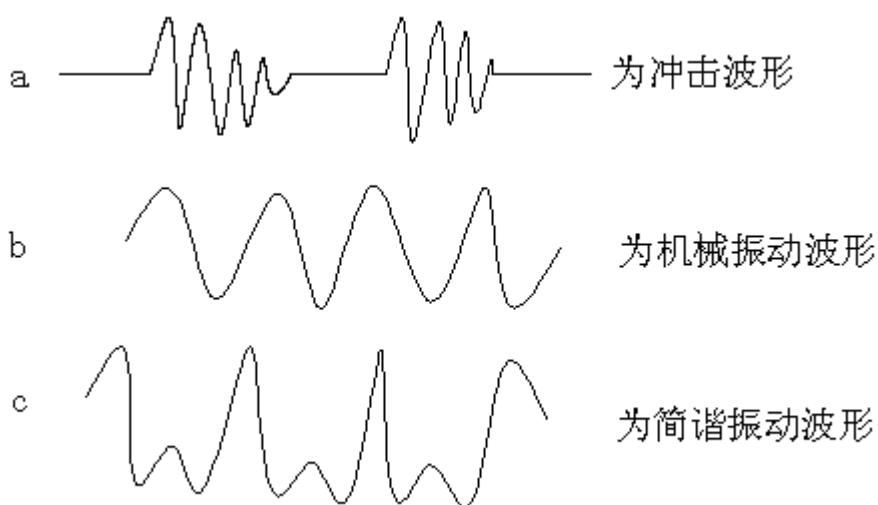
$$\text{对数振动率: } \lambda = \ln \frac{A_m}{A_m + 1}$$

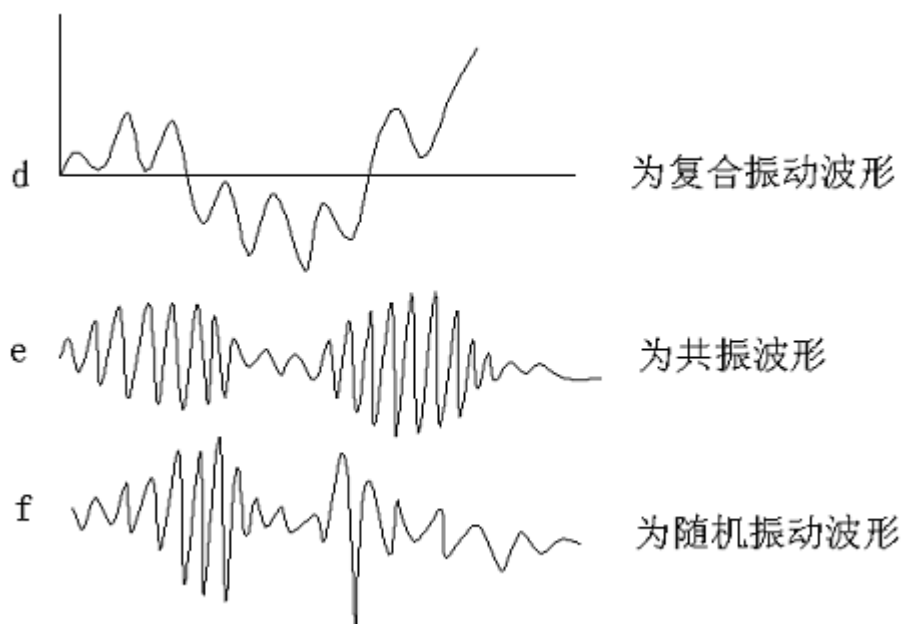
$$\text{圆频率: } \varepsilon = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

$$\text{阻尼比: } \xi = \frac{\varepsilon}{\omega} = \frac{\lambda}{2\pi}$$

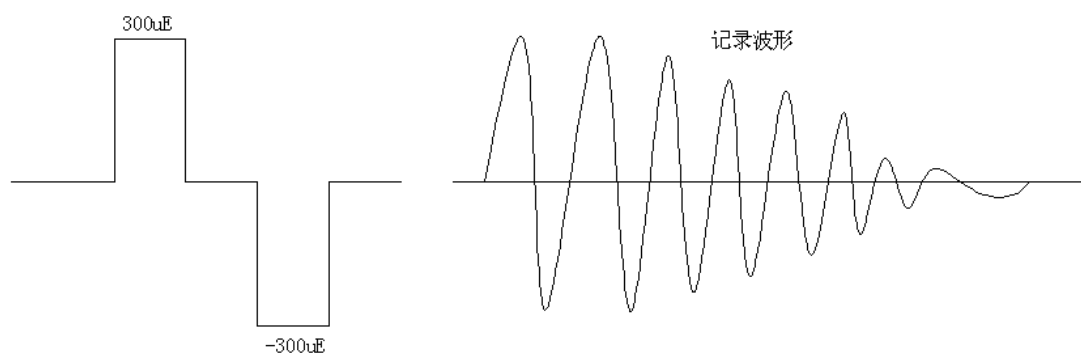
$$\text{动力系数: } \beta = \frac{1}{2\xi}$$

- (3) 分析实测振动波形

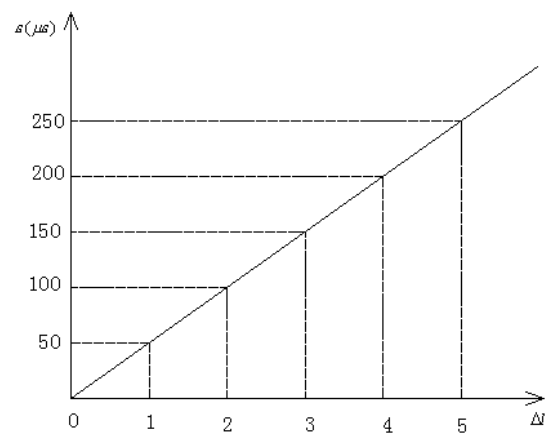
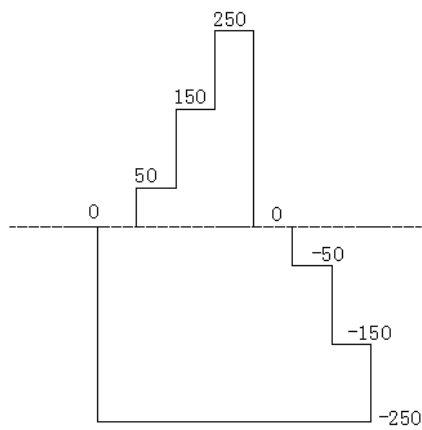




(4) 动态应变中波形标定



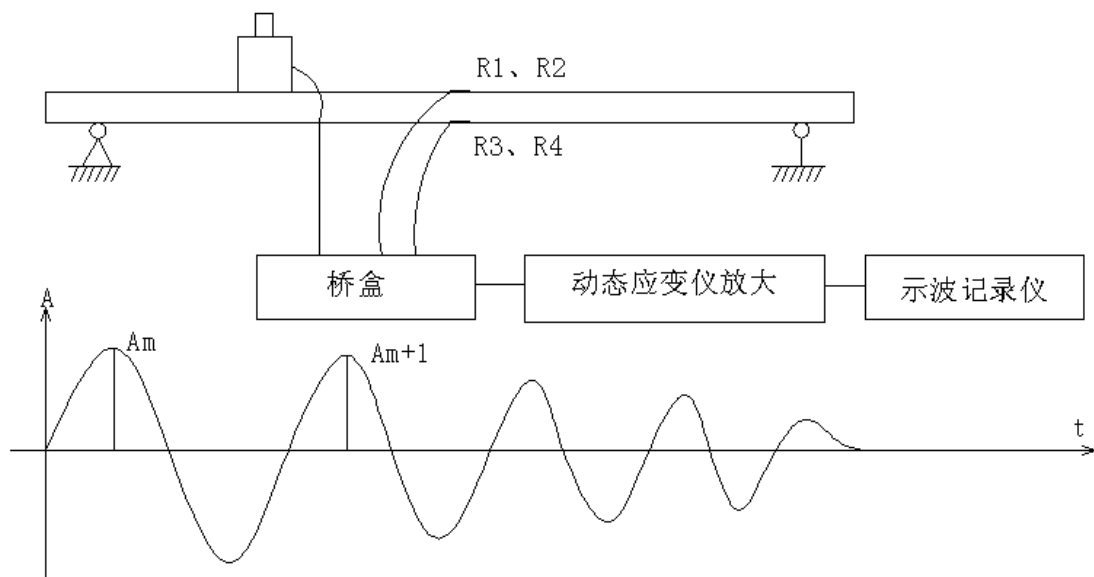
标定时必须根据需要确定的衰减档 1、1/3、1/10、1/100……然后据图形要求再确定好量程 1mv、5 mv、10 mv、50 mv、100 mv……最后做出标定曲线。



(5) 对所测波形进行定量分析

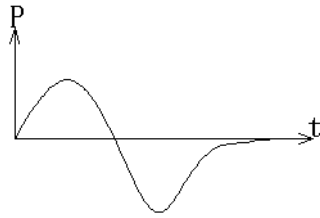
- a. 测出自振频率
- b. 测出相关的位移、速度、加速度、动应力、动力系数等

(6) 实验装置框架图

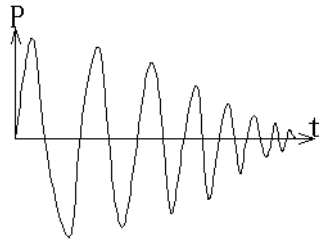


桥梁实验 3-桥梁结构动态测试（2）

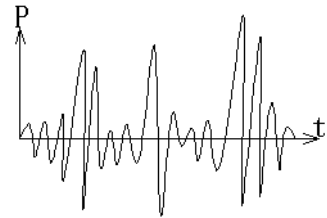
动荷实验常常用到的是三种类型，第一种是周期荷载、第二种是冲击荷载、第三种是随机荷载。它们的图形是：



第一种荷



第二种冲击荷

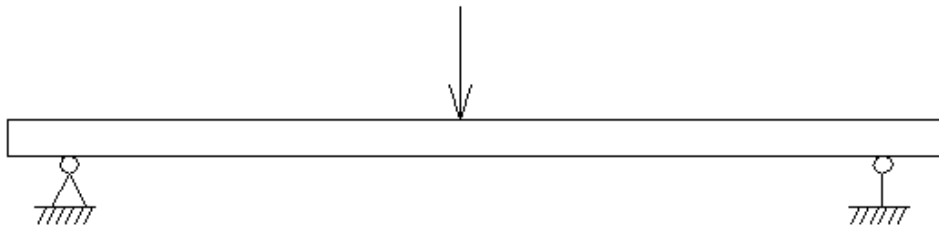


第三种随机荷

一般现在研究动荷作用下引起的动力反映以及对结构产生影响。对建筑物进行动力分析，对地震荷或风等特殊荷载，可用长期观察的历史资料进行分析，确定其作用的大小和振动规律，一般说它是有较大的概括特性和代表性，仍然需要振源动力特性统计资料，可以根据机械本身参数进行动荷特性计算。

（一）机构动力特性实验测定

1. 自由振动法（捶击法）

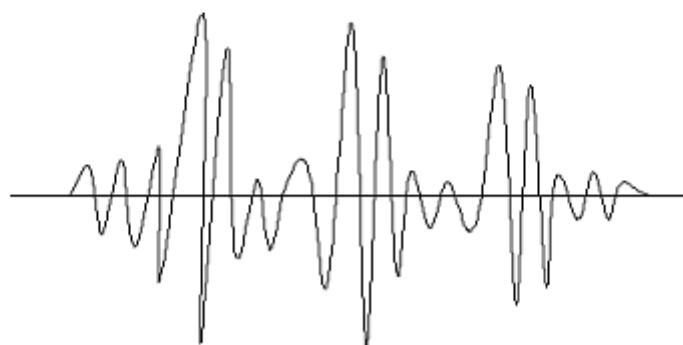
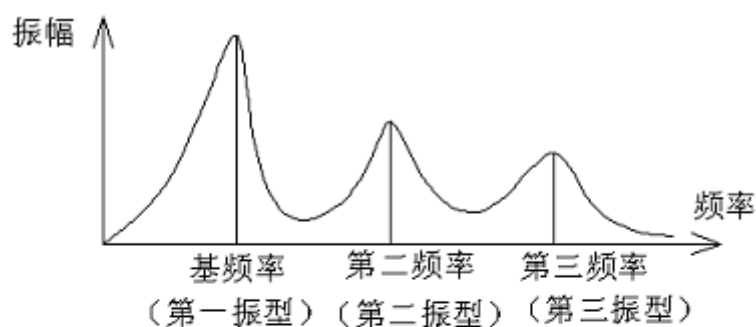


为了使结构产生只有振动，通常采用突加荷载和突卸荷载两种办法。



2. 共振法

(1) 共振法是利用三门的激振器对结构施加一个简谐动荷载使结构产生恒定的强迫简谐振动, 根据共振现象来观测结构有振性质。由于结构力学可知, 当干扰里的频率与结构本身固有频率相等时结构就出现共振. 此时建筑结构都是具有连续质量的物流, 所以严格说来都是有起码多个自由度物流, 其固有频率不是一个而是有很多个。但如前所述, 对一般的动力现象, 了解最底的第一固有频率即为基本频率是最重要的, 对于较复杂动力问题, 也只要了解若干个固有频率也就满足要求。采用共振法进行动荷实验时, 可连续改变激振器频率即基本频率、第一频率、第二频率、第三频率……, 如速度物实验时所描述得到记录曲线如下:



(2) 由共振曲线求出阻尼和阻尼比

a. 阻尼系数

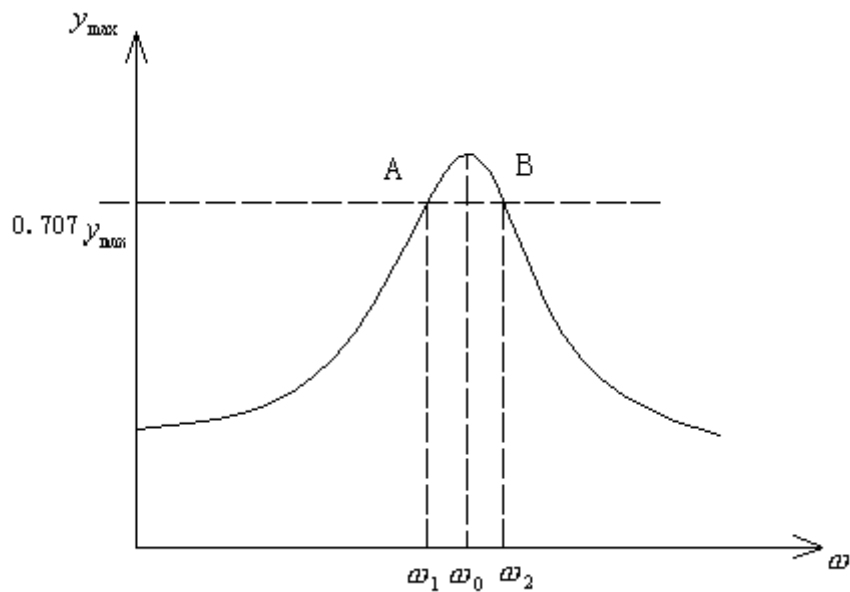
$$\beta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$$

b. 阻尼比

$$D = \frac{\beta}{\omega_0}$$

通过结构动力学可知, 按结构某一固有频率作振动时形成的弹性曲线称为结构频率的振动形式简称振型。对应于基频、第一频率、第二频率分为基本振型(第

一振型)、第二振型、第三振型。

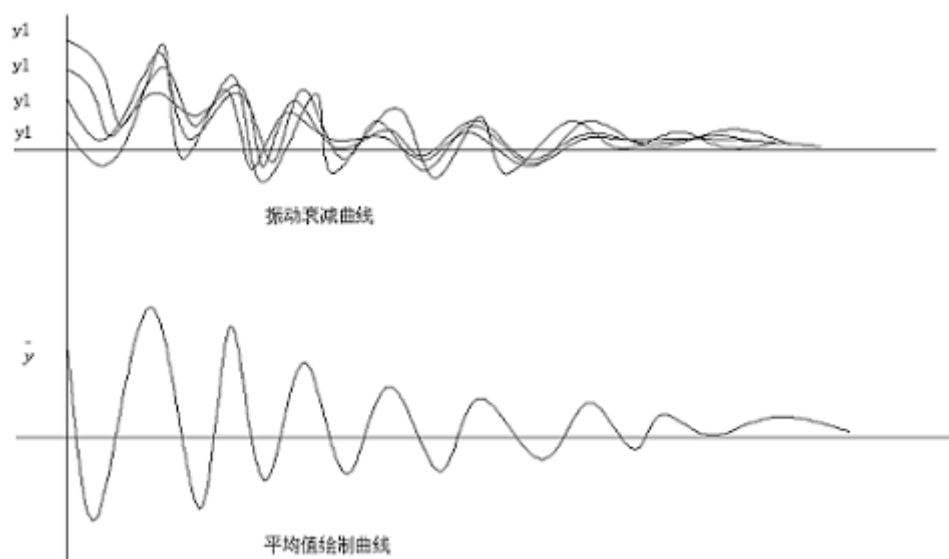


3. 脉动法：通常用于测量整体建筑物的动力特性

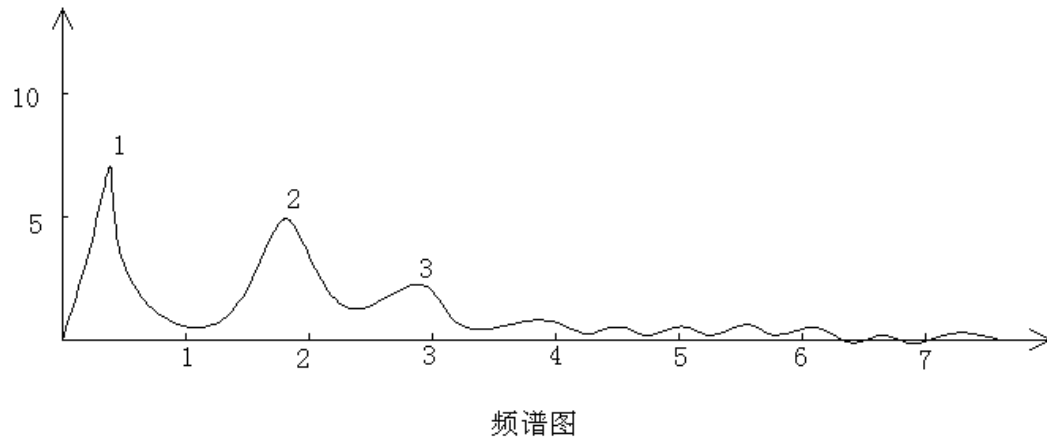
a. 主谐量法：对建筑物固有频率的谐量是脉动为主要成分来测出基本频率、第二频率、第三频率方法。

b. 统计法：由日本高桥活一郎提出的它的基本概念。当弹性体受到随机因素的影响所产生振动必定是自由振动和强迫振动的叠加。

c. 波谱分析法：将建筑物脉动记录图看成多种频率谐量合成的结果，而建筑物固有频率谐量和脉动源卓越频率的谐量为主要成分。因此用傅立叶级数的方法把脉动费解做出其频率谐波。在频率谐波图上建筑物固有频率波和脉动源的卓越频率必然出现突出的峰值，这个峰值为基频，而二频和三拼处比较明显。



以上图用傅立叶级数法将脉动分解并做出基频谱。在基频谱图上建筑物固有频率和脉动的卓越频率处，必出现突出的峰。一般在非常突出峰为基频而后为二频、三频……频谱图如下：



要点：

1. 本次实验用小锤击打（轻轻）测出频谱图和建筑物的频谱图有什么不同。
2. 通过实验了解放大器作用、使用方法，以及记录器使用方法等。
3. 通过实验对动态测量达到什么图，如何通过实测法来进一步分析频谱作用。

桥梁实验 4——桥梁结构无损检测

1 混凝土无损检测

1.1 超声测裂缝

1.1.1 超声测裂缝宽度

裂缝的出现不仅会有损于桥梁的美观，减小截面的受力面积，更重要的是它会失去对钢筋的保护作用，加速钢筋的锈蚀。裂缝的检测主要包括全桥裂缝的长度、走向和宽度。

对于裂缝的宽度的测量主要采用裂缝观测仪进行观测；

裂缝的长度变化采用在裂缝端头做标记，配合钢卷尺测量坐标的方法进行；

对于宽度大于 0.2mm 的且位于关键部位的裂缝采用超声波等无损探伤仪器对其进行深度测试。

裂缝的长度走向及扩展情况，主要通过划分网格坐标，辅钢卷尺量测裂缝的起止点、转折点坐标，并做详细记录。



图 1.1 裂缝观测镜

1.1.2 超声测裂缝深度

1 检测原理

超声法(超声脉冲法)检测混凝土裂缝深度系指采用带波形显示功能的超声波检测仪，测量超声脉冲波在混凝土中的传播速度(简称声速)、首波幅度(简称波幅)和接收信号主频率(简称主频)等声学参数，并根据这些参数及其相对变化，判定混凝土裂缝深度情况。

2 检测方法

(1) 单面平测法

当结构的裂缝部位只有一个可测表面，估计裂缝深度又大于 500mm 时，可采用单面平测法。

平时应在裂缝的被测部位，以不同的测距，按跨缝和不跨缝布置测点(布置测点时应避开钢筋的影响)进行检测。

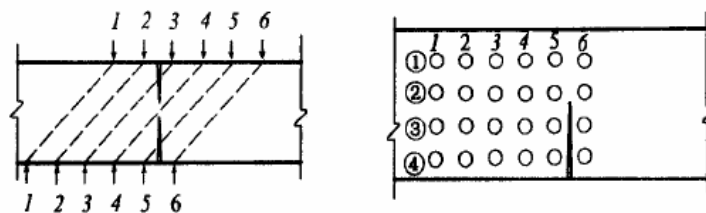


图 1.3 斜测裂缝测点示意图

裂缝深度的确定方法如下：

当 T、R 换能器的连线通过裂缝，根据波幅、声时和主频的突变，可以判定裂缝深度以及是否在所处断面内贯通。

(3) 钻孔对测法

钻孔对测法适用于大体积混凝土，预计深度在 500mm 以上的裂缝检测，被检测混凝土应允许在裂缝两侧钻测试孔。

测试前应先向测试孔中注满清水，然后将 T、R 换能器分别置于裂缝两侧的对应对应孔中，以相同高程等间距(100~400mm)从上到下同步移动，逐点读取声时、波幅和换能器所处的深度。

裂缝深度的确定方法如下：

以换能器所处深度(h)与对应的波幅值(A)绘制 h—A 座标图(如图 1.4 所示)。

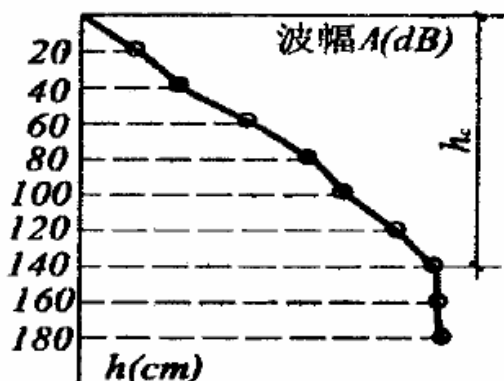


图 1.4 钻孔侧立峰深度示意图

随换能器位置的下移，波幅逐渐增大，当换能器下移至某一位置后，波幅达到最大并基本稳定，该位置所对应的深度便是裂缝深度值 h_c 。

1.2 超声回弹综合法测强和碳化深度检测

1.2.1 超声回弹综合法测混凝土强度

采用超声回弹综合法对混凝土进行强度测定，测试参照《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS02-2005)。

1、测区布置应符合下列规定：

(1) 当按单个构件检测时,应在构件上均匀布置测区,每个构件上的测区数不应少于 10 个;

(2) 对同批构件按批抽样检测时,构件抽样数应不少于同批构件的 30%,且不少于 10 件,每个构件测区数不应少于 10 个;

(3) 对长度小于或等于 2m 的构件,其测区数量可适当减少,但不应少于 3 个。

2、构件的测区应满足下列要求:

(1) 测区布置在构件混凝土浇筑方向的侧面,

(2) 测区均匀分布,相邻两测区的间距不宜大于 2m,

(3) 测区避开钢筋密集区和预埋件,

(4) 测区尺寸为 200mm×200mm,

(5) 测试面应清洁、平整、干燥,不应有接缝、饰面层、浮浆和油垢,并避开蜂窝、麻面部位,必要时可用砂轮片清除杂物和磨平不平整处,并擦尽残留粉尘。

3、结构或构件上的测区应注明编号,并记录测区位置和外观质量情况。

4、结构或构件的每一测区,宜先进行回弹测试,后进行超声测试。

5、非同一测区内的回弹值及超声声速值,在计算混凝土强度换算值时不得混用。

6、用回弹仪测试时,宜使仪器处于水平状态,测试混凝土浇筑的侧面。如不能满足这一要求,也可非水平状态测试,或测试混凝土浇筑方向的顶面或底面。

7、应按《回弹法评定混凝土抗压强度技术规程》的要求,对构件上每一测区的两个相对测试面各弹击 8 点,每一测点的回弹值测读精确至 1.0。

8、测点在测区范围内宜均匀分布,但不得布置在气孔或外露石子上。相邻两测点的间距一般不小于 30mm,测点距构件边缘或外露钢筋、铁件的距离不小于 50mm,且同一测点只允许弹击一次。

9、测区回弹值的计算参照《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS02-2005)。

1.2.2 混凝土碳化深度检测

砼碳化深度检测是使用 75% 的酒精溶液与白色酚酞粉末配置成的浓度为 1~2% 的酚酞溶剂，在被测构件选择 3 个碳化深度测试位置，将其喷在混凝土的新鲜破损面，根据指示剂颜色的变化，测量混凝土的碳化深度，量测精度准确至毫米。

在进行砼碳化深度检测时，因为要将砼表面凿开露出新鲜破损面才能滴入化学试剂进行测试，因此凿孔时在保证检测精度的情况下应该尽量减少对桥梁外观的损坏。

1.3 钢筋锈蚀

钢筋的锈蚀是使用 CANIN 钢筋锈蚀仪采用半电池电位法进行测试，如图 1.5 所示。半电池电位法是利用“ $\text{Cu} + \text{CuSO}_4$ 饱和溶液”形成的半电池与“钢筋+混凝土”形成半电池构成一个全电池系统。由于“ $\text{Cu} + \text{CuSO}_4$ 饱和溶液”的电位值相对恒定，而混凝土中钢筋因锈蚀产生的化学反应将引起全电池的变化。因此，电位值可以评估钢筋锈蚀状态。



图 1.5 CANIN 钢筋锈蚀仪

检测前，首先配制 $\text{Cu} + \text{CuSO}_4$ 饱和溶液。半电池电位法的原理要求混凝土成为电解质，因此必须对钢筋混凝土结构的表面进行预先润湿。采用液态洗涤剂的水溶液混凝土结构表面。检测时，保持混凝土湿润，但表面不存有自由水。

将 CANIN 钢筋锈蚀测定仪的一端与混凝土表面接触，另一端与钢筋相连，当钢筋露出结构以外时，可以方便地直接连接。否则，需要首先利用钢筋定位仪的无损检测方法确定一根钢筋的位置，然后凿除钢筋保护层部分的混凝土，使钢筋外露，再进行连接。连接时要求打磨钢筋表面，除去锈斑。根据半电池电位法的测试原理，为了保证电路闭合以及钢筋的电阻足够小，测试前应该使用电压表检查测试区内任意两根钢筋之间的电阻小于 1。

检测时，根据用钢筋定位仪测定的钢筋分布确定测线及测点，测点的间距为 10~20cm。用 CANIN 钢筋锈蚀测定仪逐个读取每条测线上各测点的电位值，在

至少观察 5min 时，电位读数保持稳定浮动不超过 $\pm 0.02\text{V}$ 时，即认为电位稳定，可以记录测点电位。

在对已处理的数据进行判读前，先将这些数据加以负号，绘制等电位图，然后进行判读。推荐的实测数据的评判标准见表 2。

表 2 推荐的混凝土中钢筋锈蚀电位的评判标准表

序号	电位水平 (mV)	钢筋状态
1	0 $\sim$ -200	无锈蚀活动性或锈蚀活动性不确定
2	-200 $\sim$ -300	有锈蚀活动性，但锈蚀状态不确定，可能抗蚀
3	-300 $\sim$ -400	有锈蚀活动性，发生锈蚀概率大于 90%
4	-400 $\sim$ -500	有锈蚀活动性，严重锈蚀可能性极大
5	<-500	构件存在锈蚀开裂区域
备注	(1) 表中电位水平为采用铜/硫酸铜电极时的量测值； (2) 混凝土湿度对量测值有明显影响，量测时构件应为自然状态，否则不能使用此评定标准。	

对混凝土碳化深度、钢筋混凝土保护层的检测也可以间接的推定钢筋的锈蚀情况。此外，钢筋锈蚀较严重时，在混凝土表面往往会出现锈斑，可以通过外观检查来初步评价钢筋锈蚀严重与否。

1.4 混凝土保护层厚度

混凝土保护层厚度是检测结构耐久性的重要指标，混凝土保护层可以有效隔绝外界环境对钢筋的腐蚀，保护层越厚，这种保护作用持续时间也就越长，因此需对主梁、立柱等部位进行保护层厚度测试。检测方法采用非破坏性检测方法确定其保护层厚度，量测值准确至毫米。



图 1.6 钢筋混凝土保护层厚度测定仪



图 1.7 NJJ85A 手持混凝土雷达

钢筋保护层厚度采用非破坏性方法进行检测，量测值准确至毫米。现场检测技术要求如下：

- 每个构件上的测区数不应少于 3 个；
- 测区应均匀分布，相邻两测区的间距不宜小于 2m；
- 测区应注明编号，并记录测区位置和外观情况；
- 每一测区应检测不少于 10 个测点；
- 钢筋保护层厚度测读时应将传感器置于钢筋所在位置正上方，并左右稍稍移动，读取仪器显示最小值即为该处保护层厚度；
- 每一测点值宜读取 2~3 次稳定读数，取其平均值，准确至 1mm；
- 钢筋位置测试时应选择垂直钢筋走向断面，并在结构混凝土表面缓慢移动，测其钢筋分布位置和情况。

2 拉索检测

2.1 索力检测

对于各阶主频等间距的斜拉索建议按照公式（1）计算索力

$$S = 4\rho\Delta f^2 L^2 \quad (1)$$

对于各阶主频不等间距的斜拉索，在相同的索力下，当自振频率的阶数 i 增加时， f_i/i 不再是一个常数，它随 i 的增加而增大，其各阶频率之比也不再是 1:2:3:4:...了。采用公式(1)计算精度不易控制，而且如果取得的频率阶数不同，得出的结果相差也很大。建议采用偶阶频率来推算索力

$$S = \frac{(16f_2^2 - f_4^2)\rho L^2}{12} \quad (2)$$

采用偶阶频率推算索力不仅可以消除弯曲刚度的影响，还能消除索自重垂度的影响。此外有研究表明：随着 n 的增大，缆索被更多的节点分割成多个子段，从而使横向刚度的影响加大。因此在使用该方法求固有频率时，所取的频率上限不宜太高，一般取 $n \leq 10$ 即可。

4 上部结构钢箱梁无损检测

4.1 钢梁磁粉检测

磁粉检测是利用铁磁性材料和缺陷之间的磁导率变化的原理来发现缺陷，首先对工件进行磁化，若工件表面有缺陷存在，由于缺陷处的磁阻增大而产生漏磁，形成局部磁场，磁粉便在此处显示缺陷的形状和位置，从而判断缺陷的存在。磁粉探伤设备简单、操作容易、检验迅速、具有较高的探伤灵敏度，可用来发现铁磁材料镍、钴及其合金、碳素钢及某些合金钢的表面或近表面的缺陷；它适于薄壁件或焊缝表面裂纹的检验，也能显露出一定深度和大小的未焊透缺陷。

4.2 钢梁超声检测

超声波检测是利用超声能透入金属材料的深处，并由一截面进入另一截面时，在界面边缘发生反射的特点来检查零件缺陷的一种方法，当超声波束自零件表面由探头通至金属内部，遇到缺陷与零件底面时就分别发生反射波来，在荧光屏上形成脉冲波形，根据这些脉冲波形来判断缺陷位置和大小。

4.3 钢梁射线检测

X 射线检测主要是利用 X 射线穿过被照射物体后会有损耗，不同厚度不同物质对它们的吸收率不同，把底片放在被照射物体的另一侧，射线能使胶片感光或激发某些材料发出荧光。射线在穿透物体过程中按一定的规律衰减，利用衰减程度与射线感光或激发荧光的关系可检查物体内部的缺陷。

钢结构检测时，射线穿过材料到达底片，会使底片均匀感光；如果遇到裂缝、洞孔以及气泡和夹渣等缺陷，将会在底片上显示出暗影区来。这种方法能检测出缺陷的大小和形状，还能测定材料的厚度。

桥梁实验 5——桥梁结构综合实验

（一）概况

桥梁模型选取抚顺万新大桥，是一座混凝土自锚式悬索桥。桥位所在地是属于烈度 7，结构按 8 度设防，桥住处的地情况为表层 $0.5\text{ mm} \sim 2.5\text{ mm}$ 的麦填土，其 T 是为卵砾砂岩、压碎凝质岩、角砾岩、玄武岩、花岗岩交替出现，岩石强度 $300 \sim 1500\text{ kPa}$ ，所有基础均嵌落在岩石上。地基状况良好，设计的桥基为扩大基础。

（二）模型实验目的

1. 通过模型实验，掌握桥的实验重要性，能比较合理的设计造型，使设计更为合理经济适用。
2. 通过实验使学生掌握桥梁实验所需要哪些机械仪表，同时通过实验对各种机械仪表原理使用方法。
3. 通过模型实验测试和实验分析对学生今后搞科研、拉工程都是不可缺少的环节。
- 4 通过模型实验，了解桥梁结构动力特性。

（三）实验用的仪器设备

1. 手持应变仪
2. 千分表测应变
3. 百分表测挠度和位移

加荷载采用混凝土块，每次 40 kg、60 kg、80 kg。分别测出手持应变仪读数、千分表读数和挠度读数，最后计算。压边、拉边千分表测出应变，手持算出的应变和挠度等

- 4、动载实验测试系统

（四）模型实验内容

1. 静载实验：

- （1）测出荷载 20 kg、40 kg、60 kg、80 kg 跨中挠度 f_{c20} 、 f_{c40} 、 f_{c60} 、 f_{c80} 。
- （2）测出跨中、边距在 20 kg、40 kg、60 kg、80 kg 应变（其中包括拉边和压边）。
- （3）测出踏柱纵向位移 Δ_l 。

(4) 测出塔柱低部变截面处应变。

2. 动载实验:

(1) 动载特性实验测定

a. 主振源法

b. 动荷特性法

①直接法 ②间接法 ③比较法

(2) 结构动力特性实验测定

a. 自由振动法

b. 共振法

c. 脉动法

①主谐量法 ②统计法 ③频谱分析法

(3) 结构动力反映实验测定

a. 结构特定部位参数测定法

b. 结构振动变位图法

c. 结构振动系数实验测定法

d. 强度观测法

f. 地震模拟实验法

(4) 动载实验的资料整理和分析

a. 记录图的分析 and 处理 (记录图分析、谐量分析、荷化分析)

b. 在动荷作用下结构性能的确 定

(五) 静载实验方法

1. 采用静态加荷方法, 每级 20 kg、40 kg、60 kg、80 kg。

2. 用百分表或千分表测出相应挠度 f_{c20} 、 f_{c40} 、 f_{c60} 、 f_{c80} 。

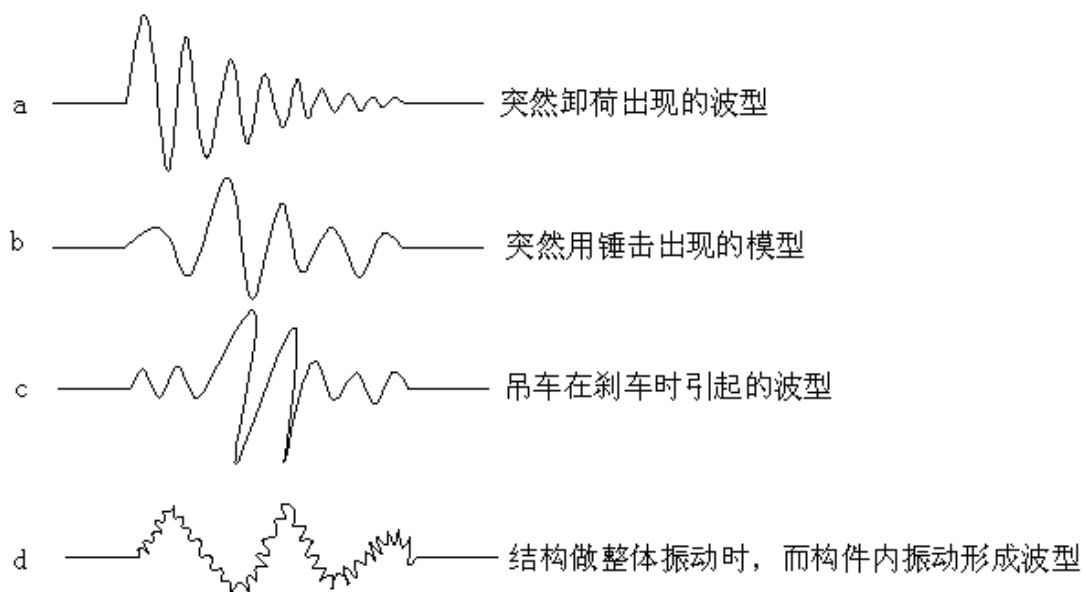
3. 本次实验用静态机械仪表和静电测仪表测量。

4. 测本桥相应荷载时跨中最大拉应变和压应变。

(六) 动载实验方法

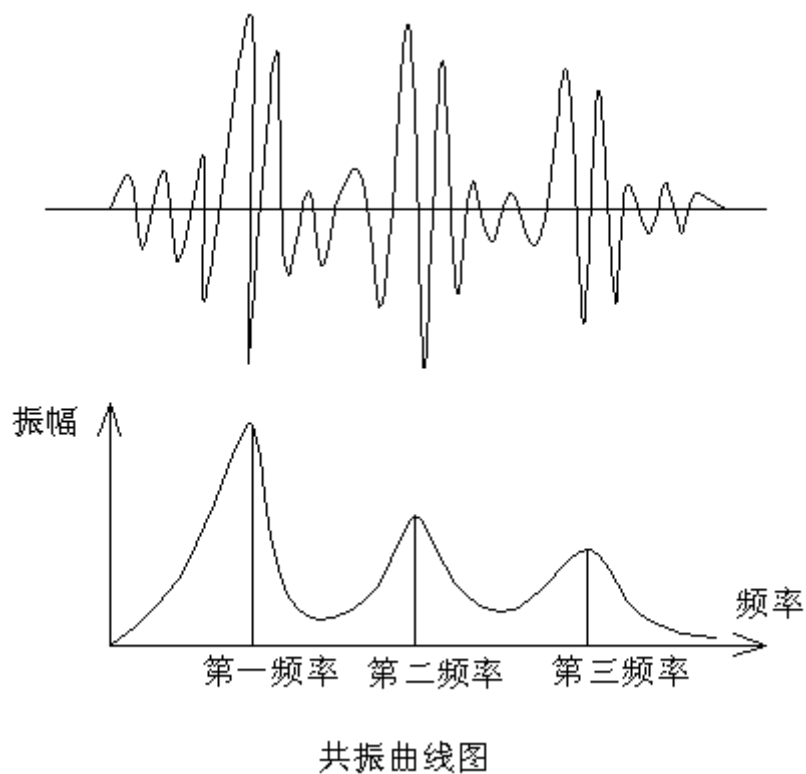
1. 自由振动法

用锤击桥梁部分, 在记录器上出现波型。大致有四种波型:



2. 共振法

采用共振激振器对结构施加共振，来达到观测结构自振性质。对于一般的动力问题。了解第一固有频率即为基振是重要的。但对复杂的动力问题还要知道第二次共振、第三次共振的频率等。



3. 脉动法

a. 主谐量法分析

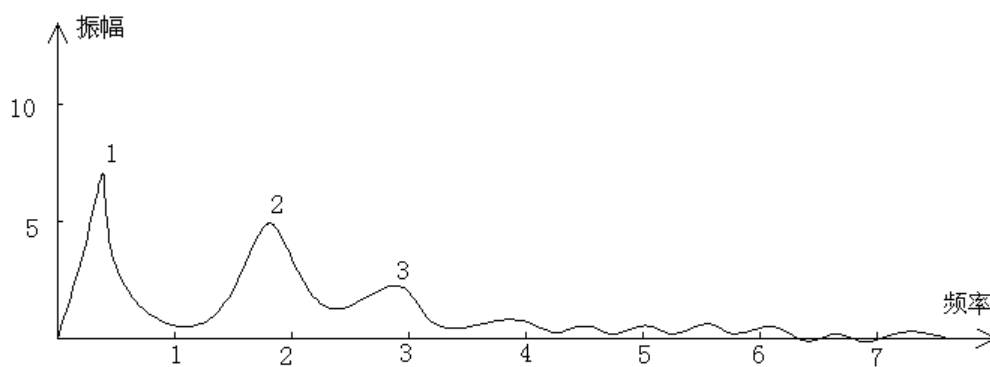
建筑物固有频率的谐量是脉动里最主要成分。在脉动图上可以测量出来。凡是振幅大波动光滑频率总是系统出现。

b. 统计法分析

当弹性体受到随机因素影响，所以产生的振动必定是仅由振动与强度的叠加。

c. 频谱分析

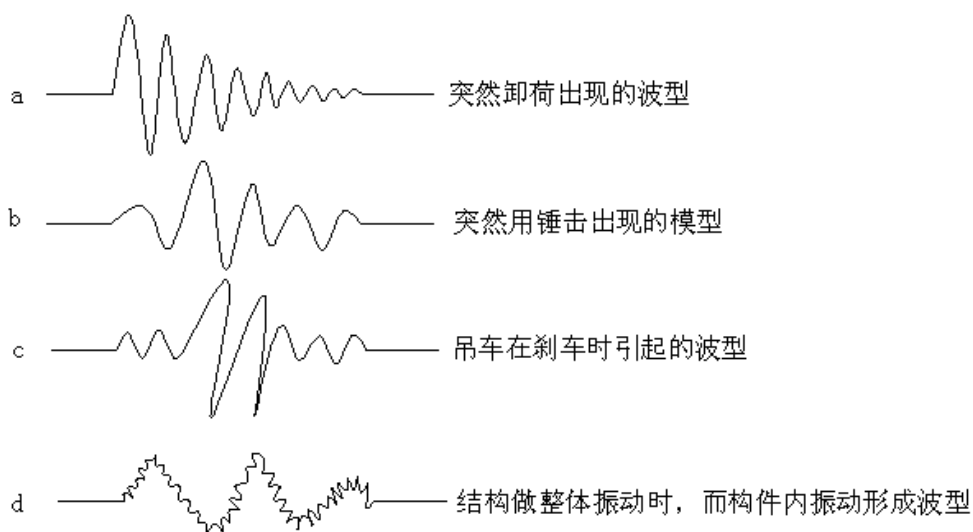
将建筑物脉动图看成各种频率的谐量合成结果。而建筑物固有频率的谐量和脉动源卓越频率处谐量为其它成分。为此用傅立叶级数方法将脉动分解并做出频谱图。在频谱图上，建筑物固有频率处和脉动源卓越频率处必然出现突出。一般基频更为突出，而二频、三频有时也能明显。



实测建筑物的频谱图

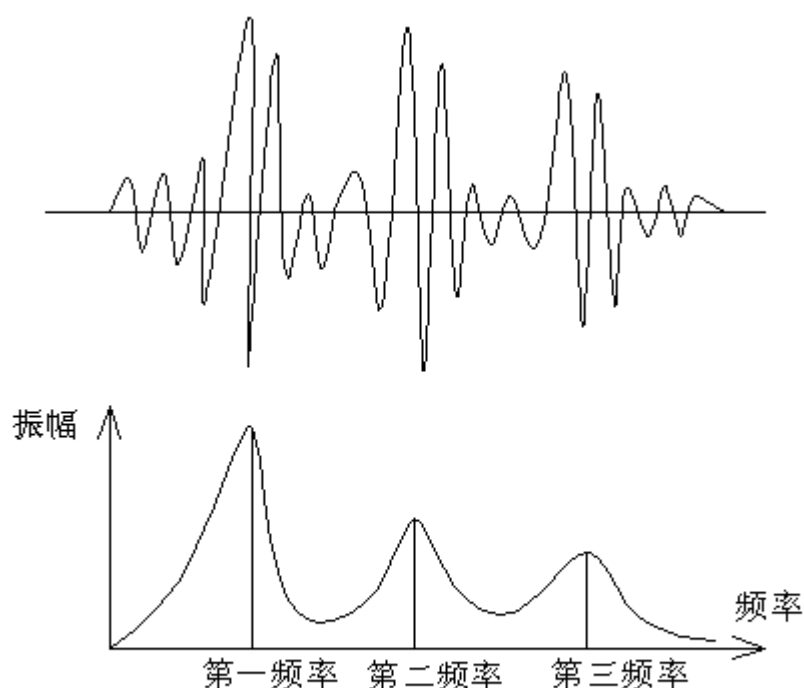
4. 自由振动法

用锤击桥梁部分，在记录器上出现波型。大致有四种波型：



5. 共振法

采用共振激振器对结构施加共振，来达到观测结构自振性质。对于一般的动力问题。了解第一固有频率即为基振是重要的。但对复杂的动力问题还要知道第二次共振、第三次共振的频率等。



共振曲线图

6. 脉动法

a. 主谐量法分析

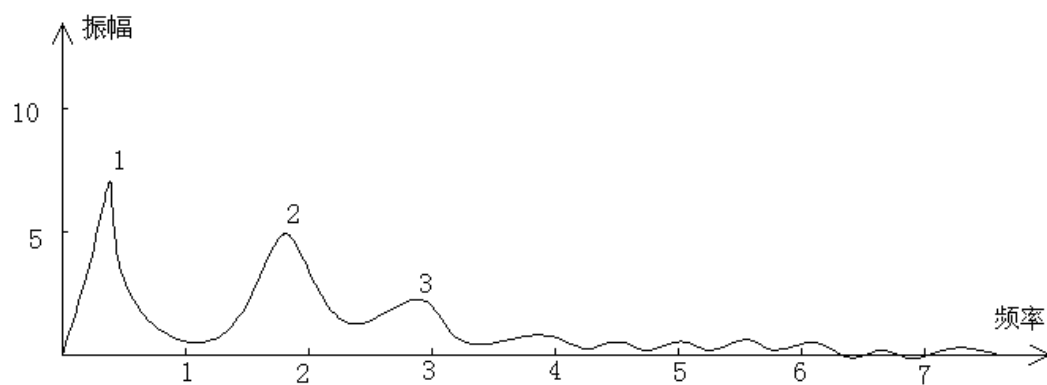
建筑物固有频率的谐量是脉动里最主要成分。在脉动图上可以测量出来。凡是振幅大波动光滑频率总是系统出现。

b. 统计法分析

当弹性体受到随机因素影响，所以产生的振动必定是仅由振动与强度的叠加。

c. 频谱分析

将建筑物脉动图看成各种频率的谐量合成结果。而建筑物固有频率的谐量和脉动源卓越频率处谐量为其它成分。为此用傅立叶级数方法将脉动分解并做出频谱图。在频谱图上，建筑物固有频率处和脉动源卓越频率处必然出现突出。一般基频更为突出，而二频、三频有时也能明显。



实测建筑物的频谱图

(六) 结果分析

1. 理论中计算出各跨中最大拉应变和压应变与实测法相对比找出相应误差分析产生原因。
2. 对跨中挠度（理论计算值与实测挠度）对比找出误差，对比误差产生原因。
3. 对塔架水平位移和塔基产生最大应变（理论与实测）对比找出误差，分析误差原因。
4. 分析结构动力特性，基频、阻尼比、振型。

桥梁实验 6——桥梁结构新技术实验

一、振动台试验

(一) 振动台及其分类

能够在试验室中人为地产生各种振动的设备，统称为振动台或激振器。
振动台按照其能量获得的形式分：电动振动台、机械式振动台和液压振动台

按模拟等效振动条件分：正弦振动台和随机振动台。

按振动的轴向力分：单向振动台和多向振动台。

目前，我国振动台制造商已生产了大量的单向（或两向单动）正弦振动台和随机振动台，并以电动台和机械台居多，对于多向振动台和多台面同步试验台正在研制之中，相信经过若干年后将会出现更先进的振动台。

如前所述，振动台按其能量获得的形式分：电动式、机械式及液压式三种。由于其工作原理不同，结构形式不一样，因此它们具有各自的特点，现列表如下：

表1

	电动台	液压台	机械台
频率范围	几Hz~几KHz (高中频) 注	0~ 几百Hz (低频、超低频)	几Hz~100Hz (低频)
激振力	较大	大	大
振幅	较大	大	较大
波形	好	较好	差
负载能力	一般	大	较大
控制	方便	方便	不方便
造价	贵	贵	低廉

注：振动台上高中低频与通常的电子控制频率划分不一样：习惯上把频率低于1 赫兹的振动台称为超低频振动台，而频率从几赫兹到几千赫兹（如5000Hz）称为中频台，而频率高于几千赫兹的（例如5000Hz 以上）称为高频台。

可见，电动振动台的特点是，频率高、波形好、振幅小、控制方便。液压振动台的特点是：超低频、大推力、大负载、控制方便。机械式振动台的特点是：低频率、大负载、波形差、但造价低。

工程试验所应根据它们的不同特点合理地选用振动台。除了上述三种形式振

动台以外，还有压电式振动台、电磁振动台、磁致伸缩振动台，但实际使用很少。

（二）振动台的主要用途

振动台的用途很广泛，但归结起来大致有以下几个方面。

- （1） 产品、构件、材料的耐振疲劳试验；
- （2） 环境例行振动试验：包括检测产品或构件的共振频率，模拟产品 或构件在实际使用中遭受的振动，以便提高其可靠性。
- （3） 动态特性试验：测试构件或材料对振动的物理效应（如应力变化等）为设计提供可靠数据。
- （4） 对各类传感器（例如加速度计、速度计、位移计等）进行标定，当然振动台的用途远不止这些，例如利用振动也可对大型铸件和大件消除应力代替回火和时效处理等。

（三）振动台的命名和主参数系列

如前所述，振动台主要分电动式、液压式和机械式三种。

根据我国专业标准JB2631-79，电动台及液压台以激振力大小作为主参数。并分别用拼音字母D（电动台）及E（液压台）来表示。而机械台则以负载能力的大小作为主参数系列，并用拼音字母J（机械台）来表示。对于冲击试验台和碰撞试验台也以负载能力作为主参数，并分别用C（冲击试验台）和P（碰撞试验台）表示，如

D-1000：表示激振力为1000 公斤力的电动式振动台

E-2000：表示激振力为2000 公斤力的液压式振动台

J-25： 表示负载能力为25 公斤的机械振动台

P-100： 表示负载能力为100 公斤的碰撞试验台

（四）振动台介绍

水平向地震台属于在实验室内再现地震试验或其它波形试验装置。通常采用电液伺服驱动方式能够获得满意效果，该系统由下列单元组成，地震台台体机架、台面、导轨系统（机械线性导轨）、水平激振系统、伺服液压油源、冷却系统、油分配器及管道，数字伺服控制及数字波形再现系统，安全保护系统，电力给水供给系统等。

主要指标

1. 运动自由度： 水平单向
2. 台面尺寸： $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$
3. 台面载重： 荷载=10T（含台面自重）
4. 水平推力 200KN
5. 振动频率： $0.1 \sim 20\text{HZ}$
6. 台面加速度： 5Hz 时达到 $2.0g$
7. 最大速度： 330mm/s
8. 水平位移： 300mm （ $\pm 150\text{mm}$ ）
9. 控制模式： 三参量 微机数字控制
10. 波形： 正弦、三角、地震、随机波
11. 导轨型式： 线性导轨总成

系统组成

该系统由下列部分组成：振动台基础、台面、水平激振系统、液压源、冷却系统、水平线性导轨、输入装置、振动测量系统、数字伺服控制及数字波形再现系统、安全保护系统、电力供给及软件系统。

1. $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 台面： 1 台
2. 水平激振器 1 台：（X 向）
3. 线性导轨件： 4 台
4. 底座： 1 台
5. 反力架： 1 套
6. 安全保护限位装置： 1 套
7. 油分配器： 1 台
8. 各种管道： 1 套（硬管和高压软管）
10. 250L/min $P=31.5$ 伺服阀（美国 Moog）： 1 台
11. 加速度计： 1 只
12. 关节球轴节（国产）： 1 套
13. 位移传感器： 1 只，量程： 300mm 精度： 0.2%
14. 数字伺服控制及数字波形再现系统， 1 套

工作原理

地震波或其它波形信号，由波形再现系统提供并处理，通过伺服控制系统，发送

给地震台；伺服控制系统可以看作是一个随动系统，当接收到地震波信号后，将按预定的波形使地震台产生振动。最后，利用地震台面上安装的位移传感器、加速度传感器，将测量的位移、加速度信号进行反馈迭代，而最终获得满意的控制精度。

伺服控制

伺服控制作为地震台的核心控制部件，控制地震台的启停、信号发生、系统保护等功能。通过位移闭环控制，实现地震台的闭环控制。

参数设置

打开伺服控制软件，首先点击参数设置按钮，将弹出参数设置对话框，系统控制参数，分别包括试验信息、系统采样频率、滤波截止频率、控制参数即 PID 参数、传感器灵敏度以及系统安全参数。这里所有参数均为系统默认参数，一般情况不需要用户修改。

其中设置的参数分别如下：

采样频率：500Hz；

截止频率：160Hz；

PID 控制参数：P 0.9；I 0.002；D 0.0；

通道定义即传感器灵敏度：

0 通道为台位移，灵敏度：13.1mv/mm；

1 通道为台加速度，灵敏度：23.5mv/m/s²；

2 通道为驱动信号；

3 通道为外部信号，灵敏度：80mv/mm；

4 通道为阀位移信号；

6 通道为载荷信号，灵敏度为 20mv/KN；

7 通道为测量 1。

安全参数包括如下：

报警位移：120mm（单峰），报警加速度：20m/s²；

停机位移：150mm（单峰），停机加速度：50m/s²；

停机驱动电压：9v。

系统闭环

当参数设置完成后，直接点击系统闭环按钮，伺服控制系统将进入位移闭环控制程序。此时地震台将处于受控状态。

地震台工作位调节

在进入伺服控制闭环后，可以通过设置台工作位，任意调整地震台的工作位，台位置限制在 $\pm 150\text{mm}$ 以内，通过改变台工作位，地震台将会平稳移动。

信号发生器

地震台可以进行信号发生，首先设置信号类型（正弦、方波、三角波、锯齿波、高斯随机噪声以及地震波等），信号频率和信号幅值，其量纲均为位移。设置好信号类型后，点击工具栏“开始”按钮将可进行信号发生功能，点击“停止”按钮将会停止信号发生。

信号频域分析窗

点击工具栏中的“频域分析窗”按钮，将会弹出频域分析窗，可以实时的显示各个信号的频谱。

地震控制

当点击面板上的“地震控制”按钮将会弹出地震波再现控制软件窗口。此时将可以进入波形再现控制程序，进行地震波再现控制实验。

二、疲劳实验

（一）疲劳实验

1829 年德国人阿尔伯特(J. Albert)为解决矿山卷扬机服役过程中钢索经常发生突然断裂,首先以 10 次/分的频率进行疲劳试验 18521869 年德国人沃勒(A. Whler)为研究机车车辆开始以 15 次/分的频率对车辆部件进行拉伸疲劳试验,以后又用试样以 72 次/分的频率在旋转弯曲疲劳试验机进行旋转弯曲疲劳试验,他的功绩是指出一些金属存在疲劳极限,并将疲劳试验结果绘成应力与循环周次关系的-曲线, 又称为 Whler 曲线。1849 年英国人古德曼 (J. Goodman)首先考虑了平均应力不为零时非对称载荷下的疲劳问题并提出耐久图,为金属制件的寿命估算和安全可靠服役奠定理论基础。1946 年德国人魏布尔 (W. Weibull)对大量疲劳试验数据进行统计分析研究,提出对数疲劳寿命一般符合正态分布(高斯分布),阐明疲劳测试技术中应采用数理统计。

60 年代初,从断裂力学观点分析金属疲劳问题,进一步扩大了疲劳研究内容。近年来,由于电液伺服闭环控制疲劳试验机的出现以及近代无损

检验技术、现代化仪器仪表等新技术的采用，促进了金属疲劳测试技术的发展。今后应着重各种不同条件(特别是接近服役条件)下金属及其制件的疲劳测试技术的研究。

试验种类和判据 金属疲劳试验种类很多，通常可分为高周疲劳、低周疲劳、热疲劳、冲击疲劳、腐蚀疲劳、接触疲劳、声致疲劳、真空疲劳、高温疲劳、常温疲劳、低温疲劳、旋转弯曲疲劳、平面弯曲疲劳、轴向加载疲劳、扭转疲劳、复合应力疲劳等。应根据金属制件的服役（工作）条件来选择适宜的疲劳试验方法，测试条件要尽量接近服役条件。进行金属疲劳试验的目的在于测定金属的疲劳强度（抗力），由于试验条件不同，表征金属疲劳强度的判据（指标）也不一样。

（二）疲劳试验机

功能用途：

电液伺服疲劳试验机主要用于金属及非金属等各种材料结构疲劳试验，进行转疲劳耐久性试验，完成材的在不同环境下的力学测试。

依据标准：

符合 GB/T2611《试验机通用技术要求》、JB/T9370《扭转试验机技术条件》、GB10128《金属室温扭转试验方法》等标准要求。

性能特点：

- 1、采用电液伺服和液压摆动马达驱动技术；
- 2、采用“卧式落地结构”动态稳定性好，试验台上、下件方便，随意，安全可靠；
- 3、不同试验所需参数一扭矩，频率，转角等可通过计算机屏幕设定显示，试验的进程情况也可以随时调用和查询；
- 4、试验软件可在 Windows2000/xp 系统下操作，微机系统可以完成试验设定，工作状态控制，数据采集，运算处理。显示并打印试验结果；
- 5、安全保护：发生从动盘总成破坏，工装断裂及设备故障时，自动停止试验并报警，在自动控制试验过程中，试验机具有超载、超压、越温、试件断裂等保护功能。

工作条件：

- 1、环境温度：10-35℃；
- 2、相对湿度：≤85%；

- 3、电源：三相五线制，50HZ，电源波动±10%；
- 4、在稳固的基础上安装，试验机水平度：0.2/1000；地面基础承载能力：3 倍设备重量；
- 5、试验室无振动，无腐蚀性介质和无强磁场干扰；
- 6、试验室应配备一定数量的 46#抗磨液压油和循环、无沉淀冷却水。

技术参数：

规格型号		R-9003NZ	R-9005NZ	R-9010NZ	R-9020NZ	R-9050NZ	R-9100NZ
最大扭矩	动态（N.m）	±300	±500	±1000	±2000	±5000	±10000
	静态（N.m）	300	500	1000	2000	5000	10000
测量准确度	扭矩	优于示值的±0.5%（静态）优于示值的±1.0%（动态）					
	扭角	优于示值的±0.5%（静态）优于示值的±1.0%（动态）					
	速度	优于示值的±1.0%					
扭角分辨率(°)		0.1					
动态试验	试验频率(Hz)	0.1～50（最高可达100Hz）					
	试验摆角	根据液压伺服泵站排量确定频率和摆角					
	试验波形	正弦波、三角波、梯形波等					
机械参数	摆动角度（°）	±45（±90）					
	夹头间间距（mm）						
	夹持试样尺寸（mm）						
试验方向：		正、反向试验					
控制方式		扭矩、角度全数字闭环控制，控制方式相互转换无冲击					
试验软件		采用 Windows 中文环境下工作，试验过程全部纳入计算机控制					
备注：REGER 保留机型升级的权利，更新后恕不另行通知，请在咨询时问清详细情况。							

基本配置：

- 1、试验机主机机架 1 台
- 2、液压伺服泵站 1 套
- 3、伺服作动器总成 1 套
- 4、测控系统 1 套
- 5、工控机 1 台
- 6、HP 打印机 1 台
- 7、专用试验软件 1 套