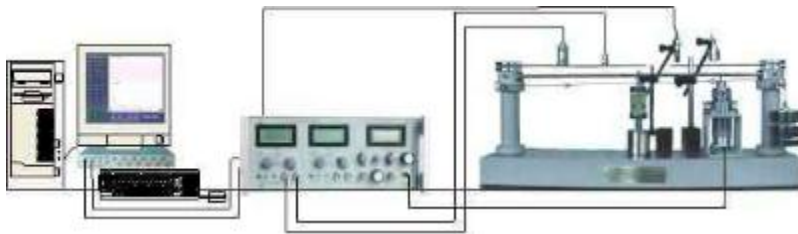




结构力学实验指导书

,土木、力学等专业,



上海大学力学系

2009 - 3

实验一 刚架(桁架)多点应力应变测量

一、实验目的

直观地了解钢架、桁架、多杆系、超静定、装配应力模拟等系统的实际工作状况，掌握实验应力分析的方法，提高工程应用的能力，并能自行设计实验方案并实施实验，从而达到掌握力学实验的基本原理与基本操作方法，提高综合分析问题与解决问题的能力。

二、实验装置及介绍

1(刚架(桁架)多功能组合试验台(拱式和三角式，见图1-1)。

2(DH3818静态电阻应变仪、GGD-B载荷显示器、计算机(参见图1-2)。

3(电阻应变计安装用材料及工具。

本实验装置

“刚架(桁架)多功能组合试验台” (拱式和三角式)，设计成钢架和桁架二者可转换的结构，使学生通过实验能直观地了解这二种结构的差别和受力状态的不同。利用本实验装置可以进行包括钢架静态应力分析系统、桁架静应力分析系统、不同支撑的钢架(桁架)应力分析系统、多杆系应力分析系统、超静定系统、装配应力模拟系统等多个力学实验的项目。数据处理部分采用国内先进的计算机多点自动数据采集与分析系统。此实验装置能根据学生的教学需要将各种实验内容分成几个相互独立的实验，也可将其组合成多种受力状态的综合性实验。



(a) 拱式刚架 (b) 三角式刚架

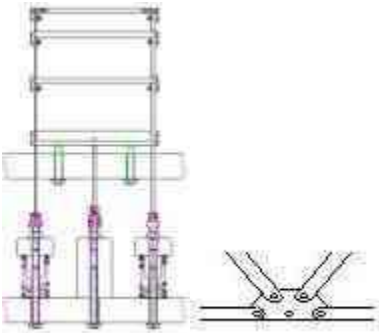
图1-1 刚架(桁架)多功能组合试验装置



图1-2 多功能组合测试系统



(a)



(b) (c) (c)

(b)

(b)(c)

图1-3 刚架(桁架)的正视图上部(a)、节点局部(b)和侧视图(c)

三、实验原理

刚架及桁架是工程上最常见的结构之一，刚架及桁架模拟实验装置的结构形式如图1-15-3(a)所示，其节点局部如图1-15-

3(b)所示，调节螺栓可以实现刚架和桁架结构的转换。刚架(桁架)的侧

-15-

3(c)所示，调节下部的螺栓可以改变刚架(桁架)的支撑条件，同时侧面结构还具有视图如图1

超静定系统、装配应力模拟等实验功能。

四、实验方法及步骤

1(确定试验方案:根据需要确定要做的试验内容，进行刚架或桁架结构的组合，并设置边界条件。 2(选择并确定需要测量的位置，测量尺寸和角度。

3(按照电阻应变计的粘贴工艺将电阻应变计安装在被测点上，选取合适的桥路组合。

4(连接并调试电阻应变仪:打开DH3818静态测试系统控制软件，软件的操作界面如图1-15-

4所示，系统自动由“手动控制”状态切换到“自动控制”；查找机箱:选择合适的串行口COM1或COM2。

5(平衡操作:输入自定义文件名，单击“平衡”按钮。若需要显示平衡结果，点击“显示平衡结果”选框;若存在不平衡点，在“未平衡测点数”下拉式列表框中显示不平衡点，找出不平衡原因。

6(进行参数设置(具体操作见仪器使用说明书)，参数设置的弹出框如图1-15-5所示;选择采样方式:单次采样或定时采样。

7(打开GGD-B载荷显示器，调零;转动手柄等差加载，应变仪记录实验数据。

8(整理试验数据，并与有限元的计算结果进行比较，分析误差原因。

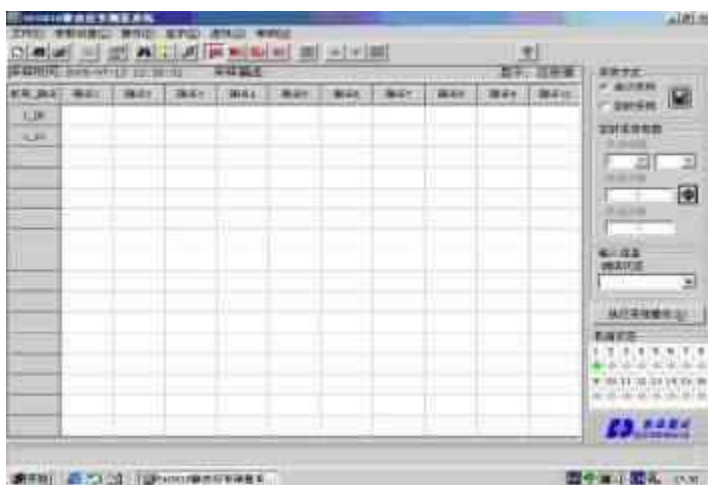


图1-4 DH3818静态测试系统软件的操作界面



图1-5 参数设置的弹出框

五、主要实验内容

- 1(弹性支撑条件下的刚架、桁架应力分析。
- 2(钢架结构、桁架结构应力分析。
- 3(结构装配应力实验。
- 4(多杆系、复合材料杆系组合实验。
- 5(超静定结构实验。
- 6(空间力系、复杂应力状态下的应力测试实验。
- 7(多点巡检应力测量。

实验二 曲梁与拱的应力实验

一、实验目的

- 1(测量曲梁与两铰拱结构的轴向应变与应力。
- 2(由实验结果算出结构的轴力和弯矩，并与理论值比较，分析曲梁和拱结构的受力特点。

二、实验设备

多功能压杆试验台、曲梁与拱装置、应变仪、游标卡尺、直尺等

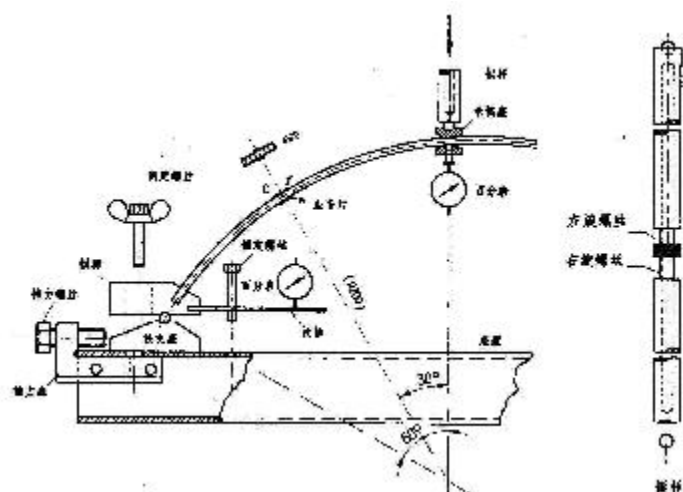


图2-1 实验装置简图

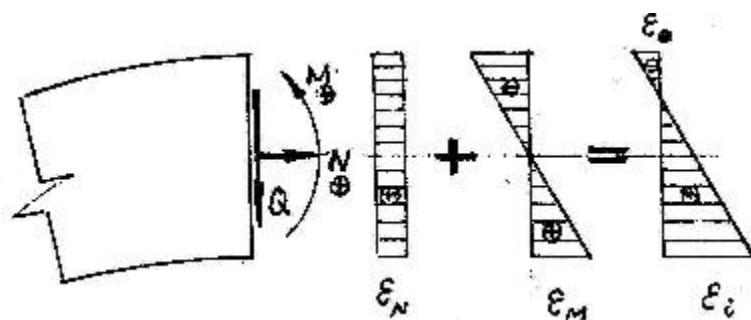


图2-2 截面应力分布

三、实验装置与实验原理

。实验装置如图16-

1所示。试件为弹簧钢制成的矩形截面曲杆，圆心角为120，拱顶有承压座，两

。侧拱腰的30截面处对称地贴有电阻应变片，拱角两端通过辊轴压在两个铰支座上，可产生微小的转动。铰支座置于方形钢管制成的底梁上，其两端装有止推座，调整推力顶丝，可改变支座的约束形式。

实验时，将本装置置于压杆试验台的底版正中，装上传力挺杆，调整好杆长，匀速、缓慢地转动施力旋钮，并通过力传感器即可进行加载实验，

构件的变形由电阻应变片和应变仪测得，并通过应力分布规律导出横截面上的轴力和弯矩。在实验中，通过改变拱址部分的约束条件，可分别完成简支曲梁、二铰拱和无铰拱的实验。

四、实验步骤

1(二铰拱实验

(1)松开蝶形螺母和锁定螺丝，检查支座安装是否妥当，推力顶丝是否顶紧。
(2)安装传力顶杆，保证有足够的行程，并调节好杆长，使初始时顶杆与承载座和滚珠座之间有良好的

接触但又基本不受力。

(3)电路连接。

(4)应变仪调整。

(5)正式实验之前，先预压几次，观察试件的变形形式并检验仪器工作是否正常。

(6)分级缓慢加载，并记录各级荷载所对应的应变值。

2(曲梁实验

拆除两端的水平约束，在铰支座下放好减摩垫片，实验程序同二铰拱。

五、数据处理和实验结果分析

(1)记录各级荷载作用下的应变值。

(2)根据实验结果，求出所测截面上的轴力和弯矩，并与理论值比较。

(3)比较曲梁和拱结构的应力和内力，并分析其原因。

实验三:变时基锤击法简支梁模态测试 一、实验目的

1(学习模态分析原理;

2(学会模态测试方法;

3(学习变时基的原理和应用。

二、实验仪器安装示意图

DASP 软件



图3-1 简支梁模态分析仪器连接示意图

三、实验原理

1(模态分析方法及其应用

模态分析方法是把复杂的实际结构简化成模态模型，来进行系统的参数识别(系统识别)，从而大大地简化了系统的数学运算。通过实验测得实际响应来寻示相应的模型或调整预想的模型参数，使其成为实际结构的最佳描述。

主要应用有：

用于振动测量和结构动力学分析。可测得比较精确的固有频率、模态振型、模态阻尼、模态质量和模态刚度。

可用模态试验结果去指导有限元理论模型的修正，使计算模型更趋完善和合理。

用来进行结构动力学修改、灵敏度分析和反问题的计算。

用来进行响应计算和载荷识别。

2(模态分析基本原理

工程实际中的振动系统都是连续弹性体，其质量与刚度具有分布的性质，只有掌握无限多个点在每瞬时的运动情况，才能全面描述系统的振动。因此，理论上它们都属于无限多自由度的系统，需要用连续模型才能加以描述。但实际上不可能这样做，通常采用简化的方法，归结为有限个自由度的模型来进行分析，即将系统抽象为由一些集中质块和弹性元件组成的模型。如果简化的系统模型中有个集中质量 m ，一般它便是一个自由度的系统，需要个独立坐标来描述它们的运动，系统的运动方程是个二阶 n 阶互相耦合(联立)的常微分方程。

模态分析是在承认实际结构可以运用所谓“模态模型”来描述其动态响应的条件下，通过实验数据的处理和分析，寻求其“模态参数”，是一种参数识别的方法。

模态分析的实质，是一种坐标转换。其目的在于把原在物理坐标系统中描述的响应向量，放到所谓“模态坐标系统”中来描述。这一坐标系统的每一个基向量恰是振动系统的一个特征向量。也就是说在这个坐标下，振动方程是一组互无耦合的方程，分别描述振动系统的各阶振动形式，每个坐标均可单独求解，得到系统的某阶结构参数。

经离散化处理后，一个结构的动态特性可由N阶矩阵微分方程描述：

$$(1) \quad \ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{M}\mathbf{x}, \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{K}\mathbf{x}, \mathbf{f}(t)$$

式中 $\mathbf{f}(t)$ 为N维激振力向量； $\mathbf{x}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}$ 分别为N维位移、速度和加速度响应向量；M、K、C分别为结构的质量、刚度和阻尼矩阵，通常为实对称N阶矩阵。

设系统的初始状态为零，对方程式(1)两边进行拉普拉斯变换，可以得到以复数s为变量的矩阵代数方程

(2) $\mathbf{M}s^2\mathbf{X}(s) + \mathbf{C}s\mathbf{X}(s) + \mathbf{K}\mathbf{X}(s) = \mathbf{F}(s)$

式中的矩阵

$$(3) \quad \mathbf{Z}(s) = \mathbf{M}s^2 + \mathbf{C}s + \mathbf{K}$$

反映了系统动态特性，称为系统动态矩阵或广义阻抗矩阵。其逆阵

$$(4) \quad \mathbf{H}(s) = \mathbf{Z}^{-1}(s)$$

称为广义导纳矩阵，也就是传递函数矩阵。由式(2)可知

$$(5) \quad \mathbf{X}(s) = \mathbf{H}(s)\mathbf{F}(s)$$

在上式中令 $s = j\omega$ ，即可得到系统在频域中输出(响应向量)和输入(激振向量)的 $\mathbf{X}(j\omega)$ 和 $\mathbf{F}(j\omega)$

关系式

$$(6) \mathbf{X}(i), \mathbf{H}(i) \mathbf{F}(i)$$

式(6)中为频率响应函数矩阵。 $\mathbf{H}(i)$ 矩阵中第行第列的元素 $H_{ij}(i)$

$$H_{ij}(i) = \mathbf{X}(i)_i / \mathbf{F}(i)_j \quad (7)$$

$H_{ij}(i)$ 等于仅在坐标 j 激振(其余坐标激振力为零)时, 坐标 i 响应与激振力之比。

在(3)式中令 $\mathbf{F}(i) = \mathbf{e}_j$, 可得阻抗矩阵

$$(8) \mathbf{Z}(i) = (\mathbf{K} + i\mathbf{C})^{-1} \mathbf{M}$$

利用实对称矩阵的加权正交性, 有

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{M} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{I}$$

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{M} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{I}$$

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{M} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{I}$$

其中矩阵称为振型矩阵, 假设阻尼矩阵也满足振型正交性关系

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{C} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{C} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{C} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{C} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{0}$$

代入(8)式得到

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{M} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{I}$$

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{M} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{I} \quad (9)$$

$$\mathbf{Z}(i) \mathbf{M} \mathbf{Z}^*(i) = \mathbf{I}$$

2 式中 $z_i(k, m)$, j, c_{rrrr}

? , ,

, $1\tau, H(i)Z(i)\Phi z\Phi$, 因此 $r,$

? , , ,

$N\Phi\Phi_{rirj}$ (10) $H_{ij22}, m(,), j2,,,1rrrr$

$ckr2r,,,$ 上式中 , , $rr2m, mrr$

、分别称为第 r 阶模态质量和模态刚度(又称为广义质量和广义刚度)。、和分别称为 mk, Φ_{rrrr} 第 r 阶模态频率、模态阻尼比和模态振型。

不难发现, N 自由度系统的频率响应, 等于 N 个单自由度系统频率响应的线形叠加。为了确定全

、和($r=1, 2, \dots, N$), 实际上只需测量频率响应矩阵的一列(对应一点激振, 部模态参数, Φ_{rrr}

r 各点测量的)或一行(对应依次各点激振, 一点测量的)就够了。 $H(i)H(i)$

试验模态分析或模态参数识别的任务就是由一定频段内的实测频率响应函数数据, 确定系统的模

r 态参数——

模态频率、模态阻尼比和振型, $r=1, 2, \dots, n$ (n 为系统在, $\Phi, (, , ? ,)_{rr12rrrrN}$

测试频段内的模态数)。

3(模态分析方法和测试过程

(1)激励方法

为进行模态分析, 首先要测得激振力及相应的响应信号, 进行传递函数分析。传递函数分析实质上

$iijj$ 就是机械导纳，和两点之间的传递函数表示在点作用单位力时，在点所引起的响应。要得到和

ijj 点之间的传递导纳，只要在点加一个频率为 ω 的正弦的力信号激振，而在点测量其引起的响应，就可得到计算传递函数曲线上的一个点。如果 ω 是连续变化的，分别测得其相应的响应，就可以得到传递函数曲线。

然后建立结构模型，采用适当的方法进行模态拟合，得到各阶模态参数和相应的模态动画，形象地描述出系统的振动型态。

根据模态分析的原理，我们要测得传递函数矩阵中的任一行或任一列，由此可采用不同的测试方法。要得到矩阵中的任一行，要求采用各点轮流激励，一点响应的方法；要得到矩阵中任一列，采用一点激励，多点测量响应的方法。实际应用时，单点响应法，常用锤击法激振，用于结构较为轻小，阻尼不大

的情况。对于笨重、大型以及阻尼较大的系统，则常用固定点激振的方法，用激振器激励，以提供足够的能量。

还有一种是多点激振法，当结构常因过于巨大和笨重，以至于采用单点激振时不能提供足够的能量，把我们感兴趣的模态激励出来。或者是结构在同一频率时可能有多个模态，这样单点激振就不能把它们分离出来，这时就要采用多点激励的方法，采用两个甚至更多的激励来激发结构的振动。

(2)结构安装方式

在测试中使结构系统处于何种状态，是试验准备工作的一个重要方面。

一种是经常采用的自由状态。即使试验对象在任一坐标上都不与地面相连接，自由地悬浮在空中。如放在很软的泡沫塑料上；或用很长的柔索将结构吊起而在水平方向激振，可认为在水平方面处于自由状态。另一种是地面支承状态，结构上有一点或若干选定点与地面固结。

如果我们所关心的实际工况支承条件下的模态，这时，可在实际支承条件下进行实验。但最好还是以自由支承为佳。因为自由状态具有更多的自由度。

(3)变时基方法的应用

在进行瞬态激励信号与响应信号采样时，激励与响应之间，特征时间与特征频率的差异太大，激励是mS级的，响应是几百mS级到秒级。如果采用等时基传递函数做瞬态激励传函分析时，就存在频率分辨力(采样频率越低，分辨力越高)和时域波形精度(采样频率越高，时域波形精度越高)这一对无法克服的矛盾。由于脉冲激励信号作用时间较短，为了确保频率分辨力，采样频率不能太高，从而导致以下几种情况:采到的激励信号偏大;采到的激励信号偏小;激励信号没有采上。计算出来的导纳值重复性差，相位不准。因此在变时基提出之前，大型结构无法用锤击法测出模态，只能使用火箭激励，因为火箭激励时加长了激励时间，且它可以产生方波激励信号。

变时基的原理:用较高的频率对力脉冲进行采样，用较低的频率对响应信号进行采样，两个采样频率的倍数就是变时倍数。采用变时基就可以解决以上问题。

三、实验步骤

有一根梁如下图所示，长(x向)680mm，宽(y向)50mm，高(z向)8mm。欲使用多点敲击、单点响应方法做其z方向的振动模态，可按以下步骤进行。

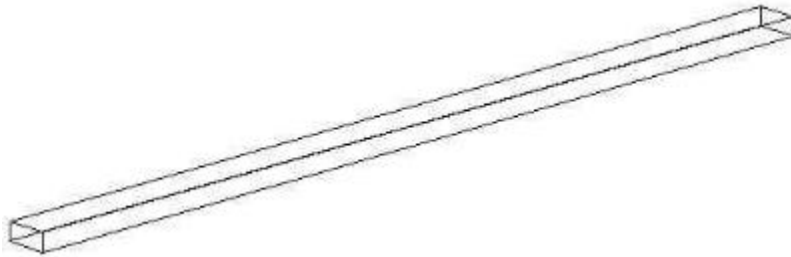


图3-2 梁的结构示意图

1. 测点的确定

此梁在y、z方向尺寸和x方向(尺寸)相差较大，可以简化为杆件，所以只需在x方向顺

序布置若干敲击点即可(本例采用多点移步敲击、单点响应方法)，敲击点的数目视要得到的模态

的阶数而定，敲击点数目要多于所要求的阶数，得出的高阶模态结果才可信。此例中在x方向把

梁分成十六等份，即可以布十七个测点。选取拾振点时要尽量避免使拾振点在模态振型的节点上，

此处取拾振点在第六个敲击点处。

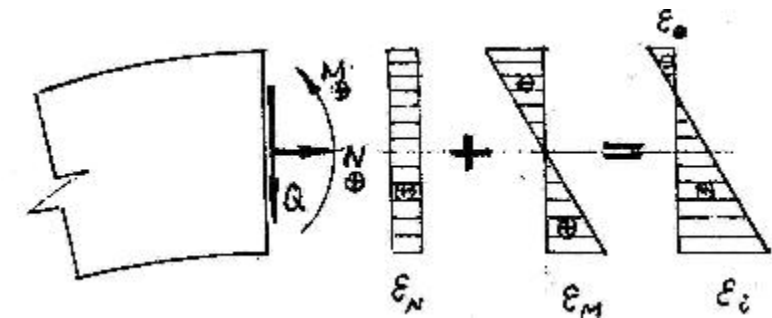
1 2 5 3 4 6 7 8 10 11 12 13 15 17 16 9 14

拾振点

图3-3 梁的测点分布示意图

2. 仪器连接

仪器连接如下图所示，其中力锤上的力传感器接ZJY-601A振动教学试验仪第一通道的电荷输入端，压电加速度传感器接ZJY-601A振动教学试验仪第二通道的电荷输入端，ZJY-601A振动教学试验仪的输入选择相应地拨到压电加速度一端。ZJY-601A振动教学试验仪的两通道输出分别接INV303/306采集仪上的第一、二通道。



压电加速度传感器

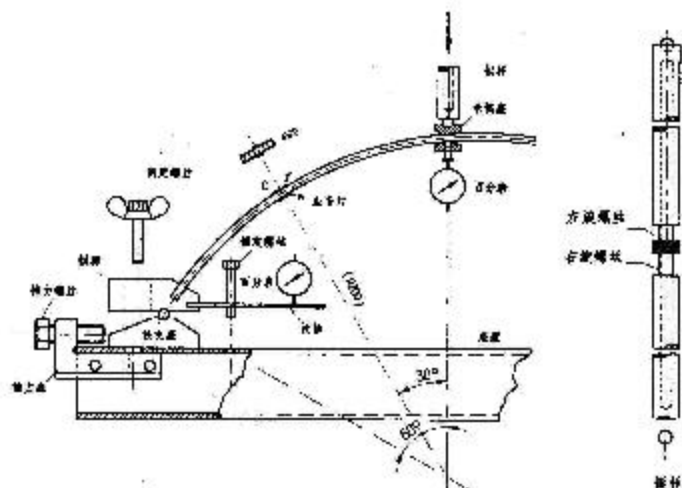
1 2 5 3 4 6 7 8 10 11 12 13 15 16 17 9 14

拾振点

INV303/306 DASP ZJY-601A型振

动与控制教学采集系统 分析软件

实验仪 图3-4 仪器连接及传感器分布示意图



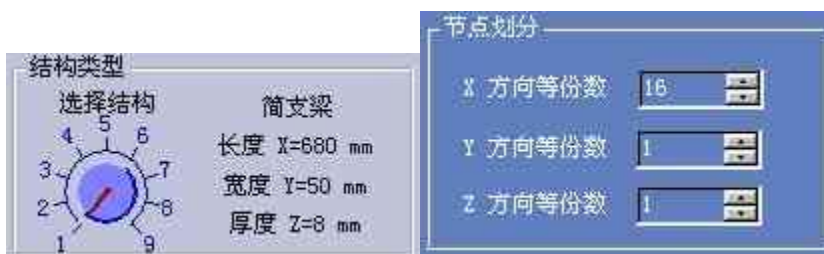
3. 结构生成

仪器连接好后，启动DASP2005标准版软件，选择模态分析按钮，进入模态分析教学系统界面。



在左边信息窗口中选择结构，选择并设置结构参数。

选择结构置1，为简支梁(2为等截面悬臂梁，3为等强度变截面悬臂梁，4为圆板，5—9是为了满足实验的多样性而扩展的结构)。



设置好参数后，可以在右面窗口中显示出当前简支梁的图型和节点分布情况。根据节点分布情况。然后把梁按图示分布测点。

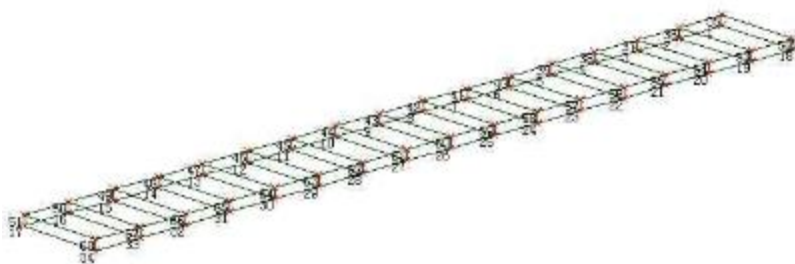


图3-5 梁的结点分布示意图

4. 参数设置与采样



在左边信息窗口中选择采样，进入采样界面。

在测量设置中设置传感器类型、总测点数和原

点导纳位置，总测点数根据结构自动读取，不可

更改。

在多次触发采样设置中设置每个测点触发采样次数，变时基倍数为4等。

用力锤敲击各个测点，观察有无波形，如果有一个或两个通道无波形或波形不正常，就要检查仪器连接是否正确、导线是否接通、传感器、仪器的工作是否正常等等，直至示波波形正确为止。在



设置中选定采样频率(例如12000Hz)和变时倍数(例如4倍)，采样长度2k，程控倍数为1，使用适当的敲击力敲击各测点，调节放大器的放大倍数或INV的程控倍数，直到力的波形和响应的波形即不过载又不是太小。选定采样时自动增加测点号，准备采样。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。
如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/358015143015006065>