

现代监控量测新技术

课程讲义

授课人： 任亮

单 位： 大连理工大学 建设工程学部

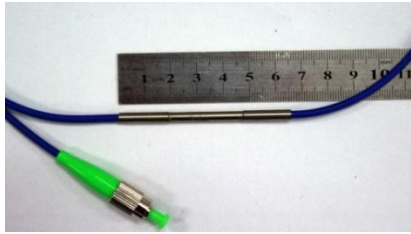
编制日期： 2016年11月1日

第一章：实验目的

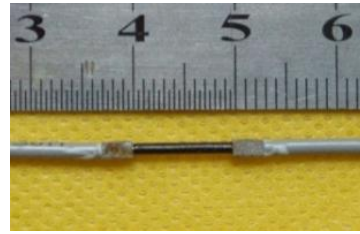
- (1) 熟悉光纤光栅应变传感器、电阻应变计、加速度传感器、位移传感器、倾角传感器的使用。
- (2) 了解在动力荷载作用下的结构响应。
- (3) 掌握结构振动控制原理及方法。

第二章：传感器介绍

2.1 光纤光栅应变传感器



增减敏型光纤光栅应变传感器



微型光纤光栅应变传感器

图 1 光纤光栅应变传感器

光纤光栅本质就是光纤，是利用掺锗光纤非线性吸收效应的紫外全息曝光等方法使纤芯中某一段长度上折射率周期性变化。

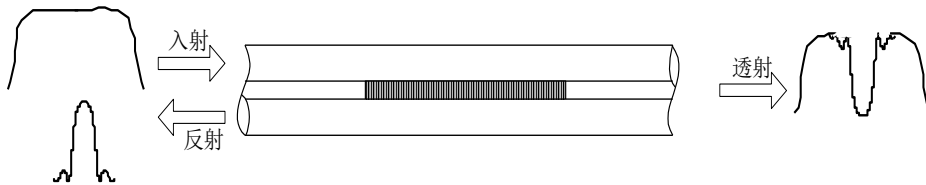


图 2 光纤光栅的结构

温度、应力等变化会导致光纤光栅反射的中心波长的变化，因此可以通过光纤光栅反射光中心波长的变化反映外界被测信号的变化情况。

光纤光栅的中心波长漂移 $\Delta\lambda$ 和纵向应变 $\Delta\varepsilon$ 的关系为：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad (1)$$

式中， $P_e = -\frac{1}{n} \frac{dn}{d\varepsilon}$ 为光纤材料的弹光系数。对于在硅光纤中写入的光纤光栅的测量灵敏度，在 1550nm 波段，应变系数为 $1.209\text{pm}/\mu\varepsilon$ 。

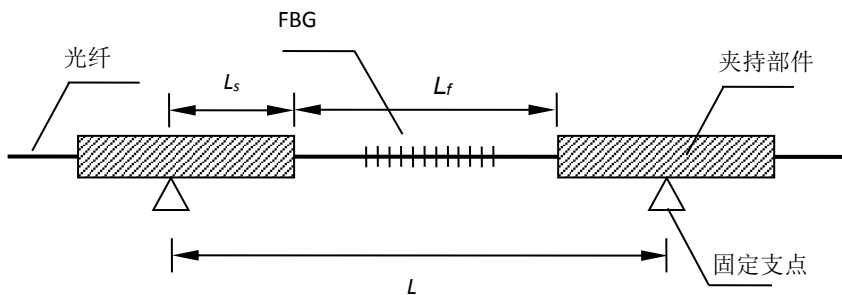


图 3 两端夹持式光纤光栅应变传感器的原理图

两端夹持式光纤光栅应变传感器的原理如图 3 所示。它由光纤光栅、两个夹持部件以及两个固定支点组成。采用胶接的方法将光纤光栅固定于夹持部件内；夹持部件为钢管；设两端固定支点的距离为 L ，两端夹持部件之间的距离为 L_f 。假设两固定支点间发生 ΔL 的轴向变形，由于钢管弹性模量较大，变形可以忽略不计，因此可以认为固定支点之间的轴向变形量全部加载到长度为 L_f 的光纤上，根据光纤以及夹持部件的截面积和弹性模量，可以得出被测结构的应变 ε 与光纤应变 ε_f 的关系为公式 3。

$$\varepsilon = \frac{L_f}{L} \varepsilon_f \quad (2)$$

对于中心波长处于 1550nm 波段的光纤光栅，传感器中心波长变化与外界应变的关系为

$$\varepsilon = \frac{L_f}{L} \varepsilon_f = \frac{L_f \Delta \lambda_{FBG}}{1.2L} \quad (3)$$

2.2 电阻应变计

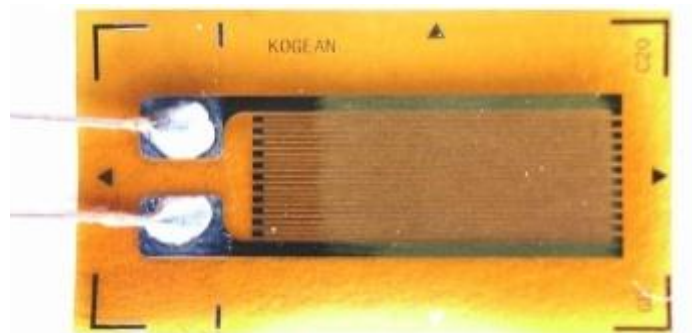


图 4 电阻应变计

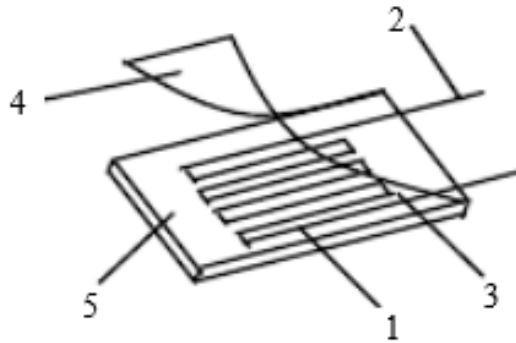


图 6 电阻应变计结构

1—敏感栅；2—引线；3—粘结剂 4—覆盖层；5—基底

电阻应变片的结构如图 6 所示，其中，敏感栅是应变片中把应变量转换成电阻变化量的敏感部分，它是用金属丝或半导体材料制成的单丝或栅状体。引线是从敏感栅引出电信号的丝状或带状导线。

粘结剂：是具有一定电绝缘性能的粘结材料，用它将敏感栅固定在基底上。

覆盖层：用来保护敏感栅而覆盖在上面的绝缘层。

基底：用以保护敏感栅，并固定引线的几何形状和相对位置。

1) 测量原理

电阻应变效应：电阻应变片能将力学量转变为电学量是利用了金属导线的应变——电阻效应。我们知道，金属导线的电阻 R 与其长度 L 成正比，与其截面积 A 成反比，即

$$R = \rho L / A$$

式中 ρ 是导线的电阻率。

将应变片贴在被测定物上，使其随着被测定物的应变一起伸缩，这样里面的金属箔材就随着应变伸长或缩短。很多金属在机械性地伸长或缩短时其电阻会随之变化。应变片就是应用这个原理，通过测量电阻的变化而对应变进行测定。一般应变片的敏感栅使用的是铜铬合金，其电阻变化率为常数，与应变成正比例关系，即

$$\Delta R / R = K \times \varepsilon$$

ΔR 为伸长或压缩所引起的电阻变化 Ω ； K 为比例常数（应变片常数）； ε 为应变。不同的金属材料有不同的比例常数 K 。铜铬合金的 K 值约为 2。这样，应变的测量就通过应变片转换为对电阻变化的测量。

2) 惠斯通电桥

惠斯通电桥适用于检测电阻的微小变化，应变片的电阻变化也可以用这个电路来测量。如图 7 所示，惠斯通电桥由四个电阻组合而成。

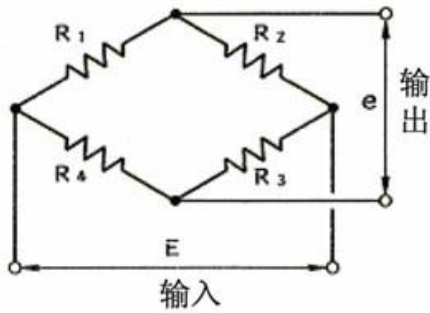


图 7

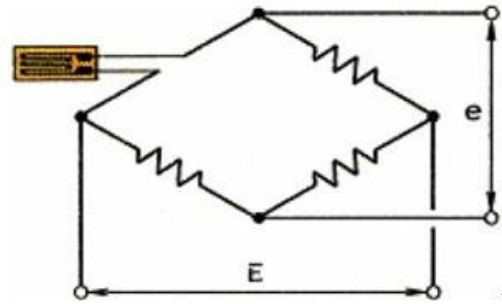


图 8

如果 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 或 $R_1 \times R_2 = R_3 \times R_4$, 则无论输入多大电压, 输出电压 E 总为 0, 这种状态称为平衡状态。如果平衡被破坏, 就会产生与电阻变化相对应的输出电压。如图 8 所示, 将这个电路中的 R_1 用应变片相连, 有应变产生时, 记应变片电阻的变化量为 ΔR , 则输出电压 e 的计算公式如下所示。

$$E = (1/4) \times (\Delta R/R) \times E \text{ 即 } E = (1/4) \times K \times \varepsilon \times E$$

上式中除了 ε 均为已知量, 所以如果测出电桥的输出电压就可以计算出应变的大小。上例电路中只联入了一枚应变片, 所以称为单一应变片法 (1/4 桥)。除此之外, 还有双应变片半桥法及四应变片全桥法。

如图 9 所示, 在电桥中联入了四枚应变片 (全桥)。四应变片法是桥路的四边全部联入应变片, 在一般的应变测量中不经常使用, 但常用于应变片式的变换器中。如图 9 所示, 当四条边上的应变片的电阻分别引起如 $R_1 + \Delta R_1$, $R_2 + \Delta R_2$, $R_3 + \Delta R_3$, $R_4 + \Delta R_4$ 的变化时若四枚应变片完全相同, 比例常数为 K , 且应变分别为 ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 。则上面的式子可写成下面的形式。也就是说, 应变测量时, 邻臂上的应变相减, 对臂上的应变相加。

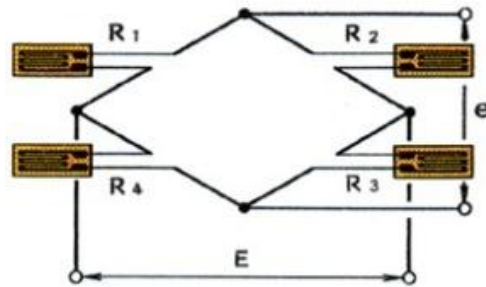


图 9

如图 10 所示, 在电桥中联入了两枚应变片, 共有两种联入方法, 即半桥邻边法 (a) 和半桥对边法 (b)。四条边中有两条边的电阻发生变化, 根据上面的四应变片法的输出电压式可得,

联入方式如图 10 (a) 所示时,

$$e = E \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) / 4 \text{ 或 } e = E(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)K/4$$

联入方式如图 10 (b) 所示时,

$$e = E \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) / 4 \text{ 或 } e = E(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)K/4$$

也就是说当联入两枚应变片时, 根据联入方式的不同, 两枚应变片上产生的

应变或加或减。

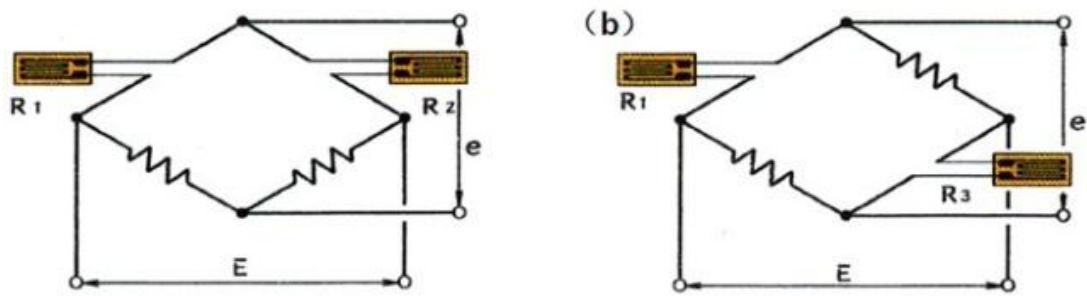


图 10 半桥：(a) 邻边和(b)对边

2.3 压电式加速度传感器



图11 压电式加速度传感器

1) 工作原理

压电式加速度传感器又称为压电加速度计，它也属于惯性式传感器。它是利用某些物质如石英晶体、人造压电陶瓷的压电效应，在加速度计受振时，质量块加在压电元件上的力也随之变化。压电敏感元件是力敏元件，在外力作用下，压电敏感元件的表面上产生电荷，从而实现非电量信号电测量的目的。压电加速度传感器的原理框图如图 12 所示，原理如图 13 所示。

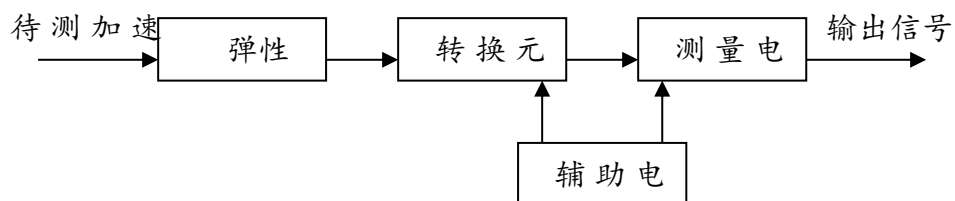


图 12 加速度传感器的组成框图

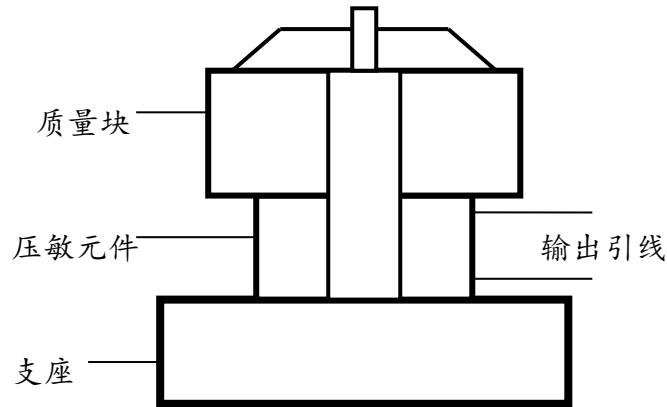


图 13 压电加速度传感器原理图

实际测量时，将图中的支座与待测物刚性地固定在一起。当待测物运动时，支座与待测物以同一加速度运动，压电元件受到质量块与加速度相反方向的惯性力的作用，在晶体的两个表面上产生交变电荷(电压)。当振动频率远低于传感器的固有频率时，传感器的输出电荷(电压)与作用力成正比。电信号经前置放大器放大，即可由一般测量仪器测试出电荷(电压)大小，从而得出物体的加速度。

压电加速度传感器的压敏元件采用具有压电效应的压电材料，换能元件是以压电材料受力后在其表面产生电荷的压电效应为转换原理。这些压电材料，当沿着一定方向对其施力而使它变形时，内部就产生极化现象，同时在它的两个相对的表面上便产生符号相反的电荷；当外力去掉后，又重新恢复不带电的状态；当作用力的方向改变时，电荷的极性也随着改变。

2.4 LVDT 位移传感器



图 14 LVDT 位移传感器

LVDT (Linear. Variable. Differential. Transformer) 是线性可变差动变压器缩写。工作原理简单地说是铁芯可动变压器。它由一个初级线圈、两个次级线圈、铁芯、线圈骨架、外壳等部件组成。当铁芯由中间向两边移动时，次级两个线圈输出电压之差与铁芯移动成线性关系。

当初级线圈 P1, P2 之间供给一定频率的交变电压时，铁芯在线圈内移动改变了空间的磁场分布，从而改变了初、次级线圈之间的互感量，次级线圈 S11, S22 之间就产生感应电动势，随着铁心的位置不同，互感量也不同，次级产生的感应电动势也不同，这样就将铁芯的位移量变成了电压信号输出，由于两个次级

线圈电压极性相反，输出电压为差动电压。

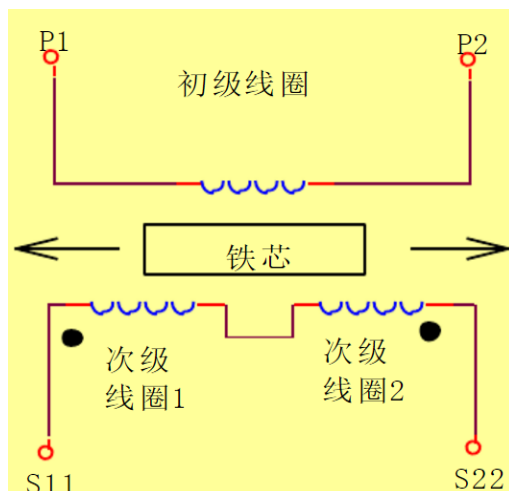


图 15 LVDT 位移传感器测量原理

当铁芯往右移动时，次级线圈 2 感应的电压大于次级线圈 1；当铁芯往左移动时，次级线圈 1 感应的电压大于次级线圈 2，两线圈输出的电压差值大小随铁芯位移而成线性变化。

2.5 倾角传感器



图 16 倾角传感器

倾角传感器经常用于系统的水平测量，从工作原理上可分为“固体摆”式、“液体摆”式、“气体摆”三种倾角传感器，还有利用加速度传感器测量倾角。倾角传感器分为单轴，双轴，单轴只能测一个方向上的倾角，双轴能同时测两个方向上的倾角。

固体摆在设计中广泛采用力平衡式伺服系统，如图 17 所示，其由摆锤、摆线、支架组成，摆锤受重力 G 和摆拉力 T 的作用， θ 为摆线与垂直方向的夹角。在小角度范围内测量时，可以认为 F 与 θ 成线性关系。如应变式倾角传感器就基于此原理。

$$F = G \sin \theta = mg \sin \theta$$

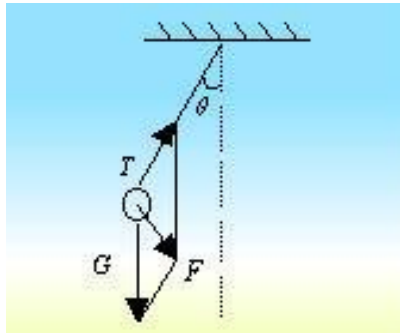
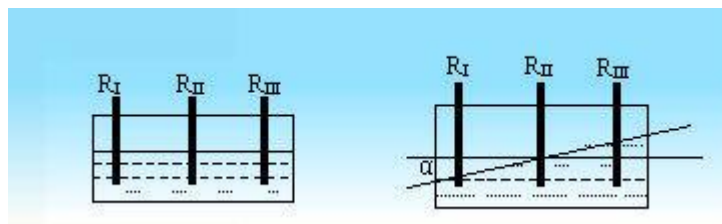


图 17 固体摆测量机理

液体摆的结构原理是在玻璃壳体内装有导电液，并有三根铂电极和外部相连接，三根电极相互平行且间距相等，如图 18 (a) 所示。当壳体水平时，电极插入导电液的深度相同。如果在两根电极之间加上幅值相等的交流电压时，电极之间会形成离子电流，两根电极之间的液体相当于两个电阻 R_I 和 R_{III} 。若液体摆水平时，则 $R_I = R_{III}$ 。当玻璃壳体倾斜时，电极间的导电液不相等，三根电极浸入液体的深度也发生变化，但中间电极浸入深度基本保持不变。如图 18 (b) 所示，左边电极浸入深度小，则导电液减少，导电的离子数减少，电阻 R_I 增大，相对极则导电液增加，导电的离子数增加，而使电阻 R_{III} 减少，即 $R_I > R_{III}$ 。反之，若倾斜方向相反，则 $R_I < R_{III}$ 。在液体摆的应用中也有根据液体位置变化引起应变片的变化，从而引起输出电信号变化而感知倾角的变化。在实用中除此类型外，还有在电解质溶液中留下一气泡，当装置倾斜时气泡会运动使电容发生变化而感应出倾角的“液体摆”。



(a)

(b)

图 18 液体摆测量机理

气体在受热时受到浮升力的作用，如同固体摆和液体摆也具有敏感质量一样，热气流总是力图保持在铅垂方向上，因此也具有摆的特性。“气体摆”式惯性元件由密闭腔体、气体和热线组成。

气体摆式检测器件的核心敏感元件为热线。电流流过热线，热线产生热量，使热线保持一定的温度。热线的温度高于它周围气体的温度，动能增加，所以气体向上流动。在平衡状态时如图 19(a)所示，热线处于同一水平面上，上升气流穿过它们的速度相同，流过热线的电流也相同，电桥平衡。当密闭腔体倾斜时，热线相对水平面的高度发生了变化，如图 19(b)所示，因为密闭腔体中气体的流动是连续的，所以热气流在向上运动的过程中，依次经过下部和上部的热线。若忽略气体上升过程中克服重力的能量损失，则穿过上部热线的气流已经与下部热线的产生热交换，使穿过两根热线时的气流速度不同，因此流过两根热线的电流也会发生相应的变化，所以电桥失去平衡，输出一个电信号。倾斜角度不同，输出的电信号也不同。

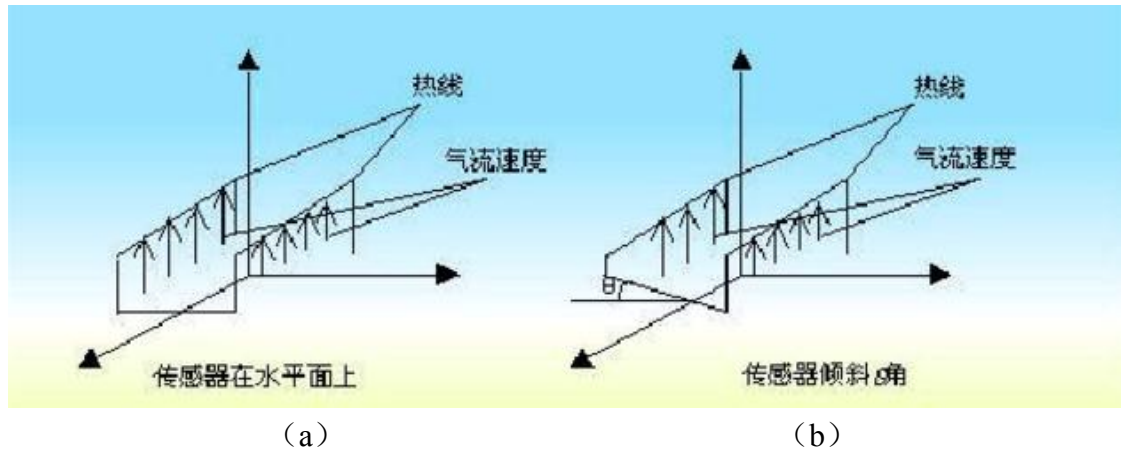


图 19 气体摆测量机理

在重力场中，固体摆的敏感质量是摆锤质量，液体摆的敏感质量是电解液，而气体摆的敏感质量是气体。气体是密封腔体内的唯一运动体，它的质量小，在大冲击或高过载时产生的惯性力也很小，所以具有较强的抗振动或冲击能力。但气体运动控制较为复杂，影响其运动的因素较多，其精度不高。固体摆倾角传感器有明确的摆长和摆心，其机理基本上与加速度传感器相同。在实用中产品类型较多如电磁摆式，其产品测量范围、精度以及抗过载能力较高。液体摆传感器介于两者之间，但系统稳定，在高精度系统中，应用较为广泛。

第三章：实验内容

(1) 模型介绍

采用弹簧钢板拼装的三层柔性框架结构模型作为测量对象，模型各层可以安装调液阻尼器和调谐质量阻尼器，模型底部固定在振动台上，通过振动台对模型施加动荷载。



图 20 三层柔性框架结构模型

(2) 仪器介绍

实验中使用的光纤光栅应变传感器、电阻应变计、加速度传感器、位移传感器、倾角传感器的测量采用本团队自行研发的光纤光栅及电类传感器同步解调仪进行数据采集。



图 21 光纤光栅及电类传感器同步解调仪

(3) 实验准备

- 1) 掌握不同类型传感器的安装方法。
- 2) 熟悉试验仪器的使用。

(4) 测量

通过在结构上安装调液阻尼器或者调谐质量阻尼器对结构进行振动控制，通过测量结构的应变、加速度、位移、倾角等信号，对比阻尼器工作前后的结构振动相应，加深学生对结构动力反应的理解。