



## 第4章 电感式传感器

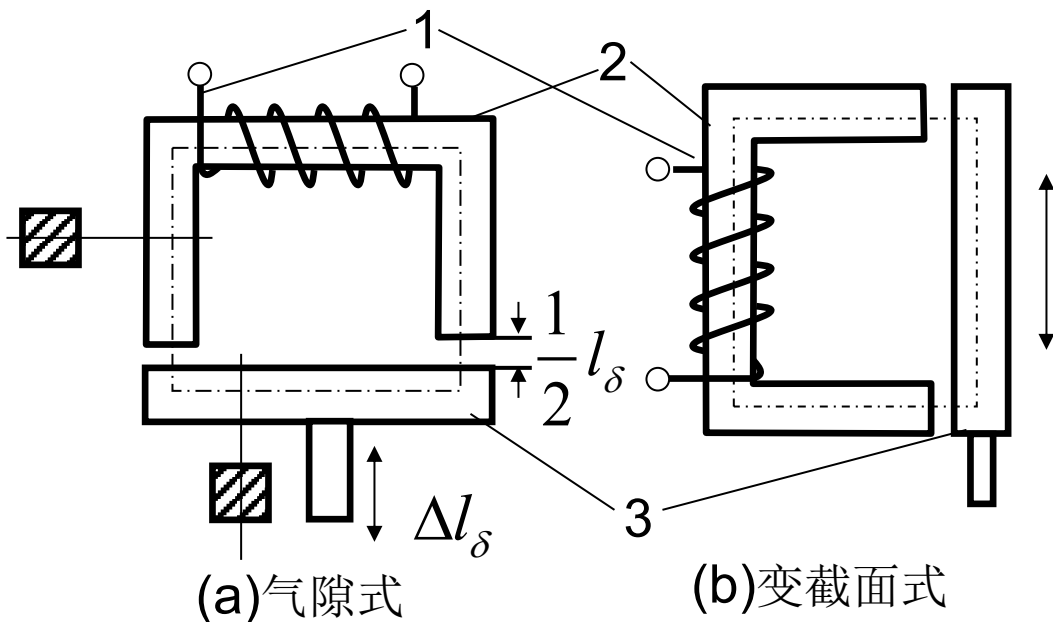
**定义：**电感式传感器是利用**电磁感应**把被测的物理量如位移，压力，流量，振动等转换成**线圈**的**自感系数**和**互感系数**的变化，再由电路转换为**电压**或**电流**的变化量输出，实现非电量到电量的转换。

**测量：**位移、振动、压力、应变、**流量**、**比重**等。

**种类：**根据**转换原理**分为：自感式和互感式两种；  
根据**结构**可分为：气隙型、面积型和螺管型。



# 一、电感传感器工作原理



衔铁移动

$l_\delta$  改变

磁路总磁阻  $R_m$  变化

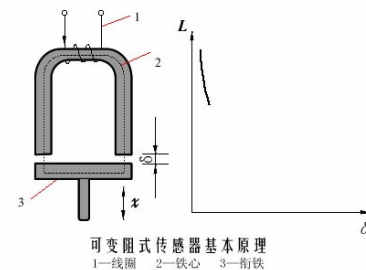
$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 S}$$

电感值  $L$  变化

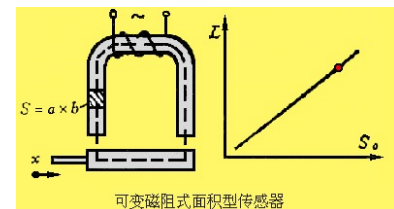
$$L = \frac{N^2}{R_m} = N^2 / \left( \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 S} \right)$$

由于“铁芯磁导率、衔铁磁导率”远大于  $\mu_0$ ，所以，上式简化为：

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{l_\delta}$$



可变阻式传感器基本原理  
1—线圈 2—铁心 3—衔铁

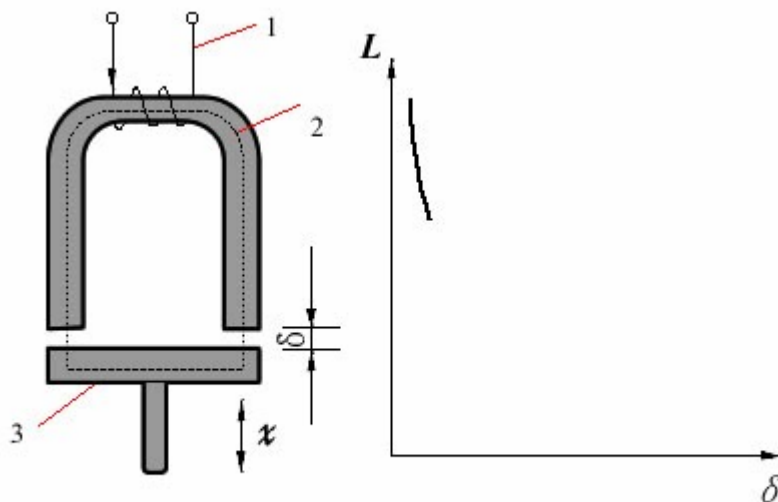


可变磁阻式面积型传感器

- $l_1$ : 铁芯磁路总长;
- $l_2$ : 衔铁的磁路长;
- $l_\delta$ : 空气隙总长;
- $S$ : 气隙磁通截面积;
- $S_1$ : 铁芯横截面积;
- $S_2$ : 衔铁横截面积;
- $\mu_1$ : 铁芯磁导率;
- $\mu_2$ : 衔铁磁导率;
- $\mu_0$ : 真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ;
- $R_m$  — 磁路总磁阻;
- $N$  — 线圈匝数。

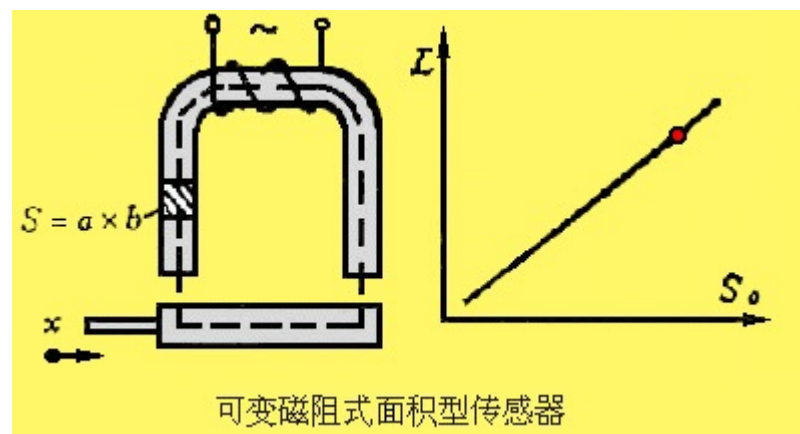
$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{l_\delta}$$

可见，这种自感式传感器的**电感 $L$** 是**气隙截面积和**气隙**长度**的函数，即 $L = f(S, l_\delta)$ 。如果 $S$ 保持不变，则 $L$ 为 $l_\delta$ 的单值函数，构成**变气隙式自感传感器**；若保持 $l_\delta$ 不变，使 $S$ 随位移变化，则构成**变截面式自感传感器**。其特性曲线如图。



可变阻式传感器基本原理

1—线圈 2—铁心 3—衔铁



可变磁阻式面积型传感器

**优点：**

①**结构简单、可靠，测量力小** 衔铁为 $0.5 \sim 200 \times 10^{-5} \text{N}$ 时，磁吸力为 $(1 \sim 10) \times 10^{-5} \text{N}$ 。

②**分辨力高** 能测量 $0.1 \mu\text{m}$ ，甚至更小的机械位移，能感受 $0.1$ 角秒的微小角位移。

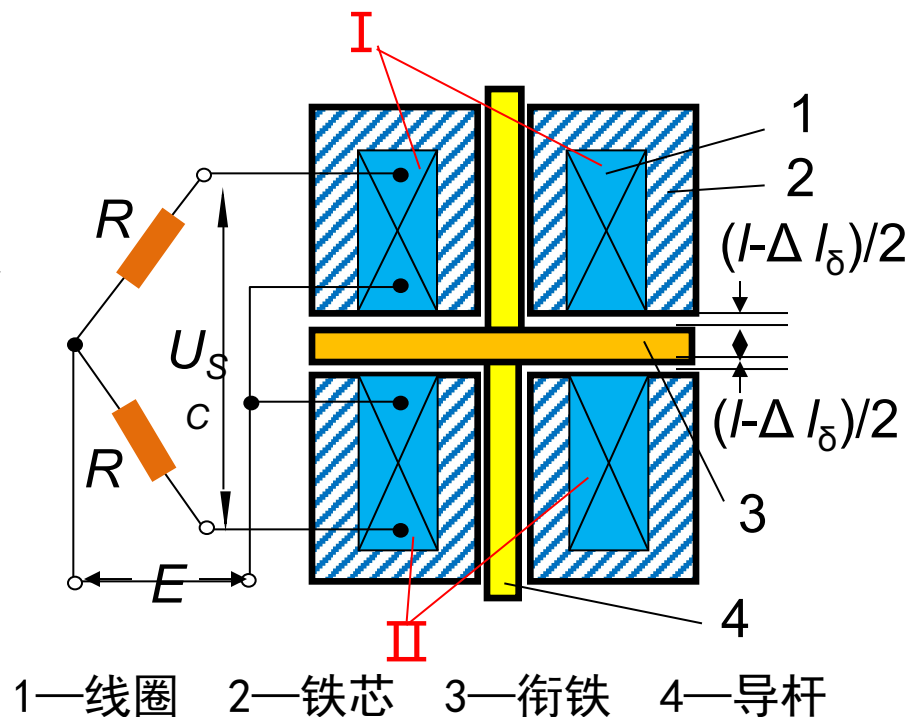
输出信号强，电压灵敏度可达**数百** $\text{mV/mm}$ 。

③**重复性好，线性度优良**

在几十 $\mu\text{m}$ 到数百 $\text{mm}$ 的位移范围内，输出特性的**线性度**较好，且比较稳定。

**缺点：**由于存在**交流零位**信号，所以不宜于高频动态测量。

**差动变气隙式自感传感器**结构由两个电气参数和磁路完全相同的线圈组成。当衔铁3移动时，一个线圈的自感增加，另一个线圈的自感减少，形成差动形式。

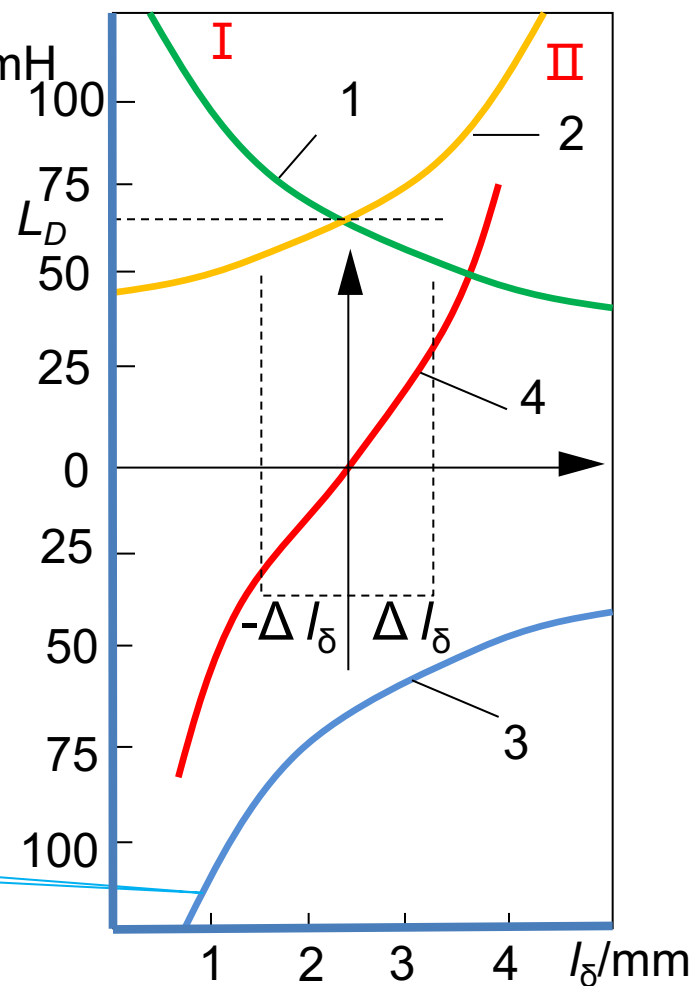


可将这两个差动线圈分别接入测量**电桥邻臂**，磁路总气隙变化为 $\Delta l_\delta$ ，则有：

- ①差动式自感传感器的**灵敏度比单线圈传感器提高一倍**
- ②差动式自感传感器**非线性失真小**，如当 $\Delta l_\delta / l_\delta = 10\%$ 时（略去 $l / l_\delta \cdot \mu_r$ ），单线圈 $\delta < 10\%$ ；而差动式的 $\delta < 1\%$ 。

对差动气隙式传感器其 $\Delta l_\delta/l_\delta$ 与 $l/(l_\delta\mu_r)$ 的变化受到灵敏度和非线性失真相互矛盾的制约,因此只能适当选取。一般差动变隙式自感传感器 $\Delta l_\delta/l_\delta=0.1\sim 0.2$ 时,可使传感器非线性误差在3%左右。其工作行程很小,若取 $l_\delta=2\text{mm}$ ,则行程为 $(0.2\sim 0.5)\text{mm}$ ;对于较大行程的位移测量,则需采用第三种电感式传感器,即:螺管式自感传感器。

差动式自感传感器的输出特性



1-线圈 I 自感特性; 2-线圈 II 自感特性;

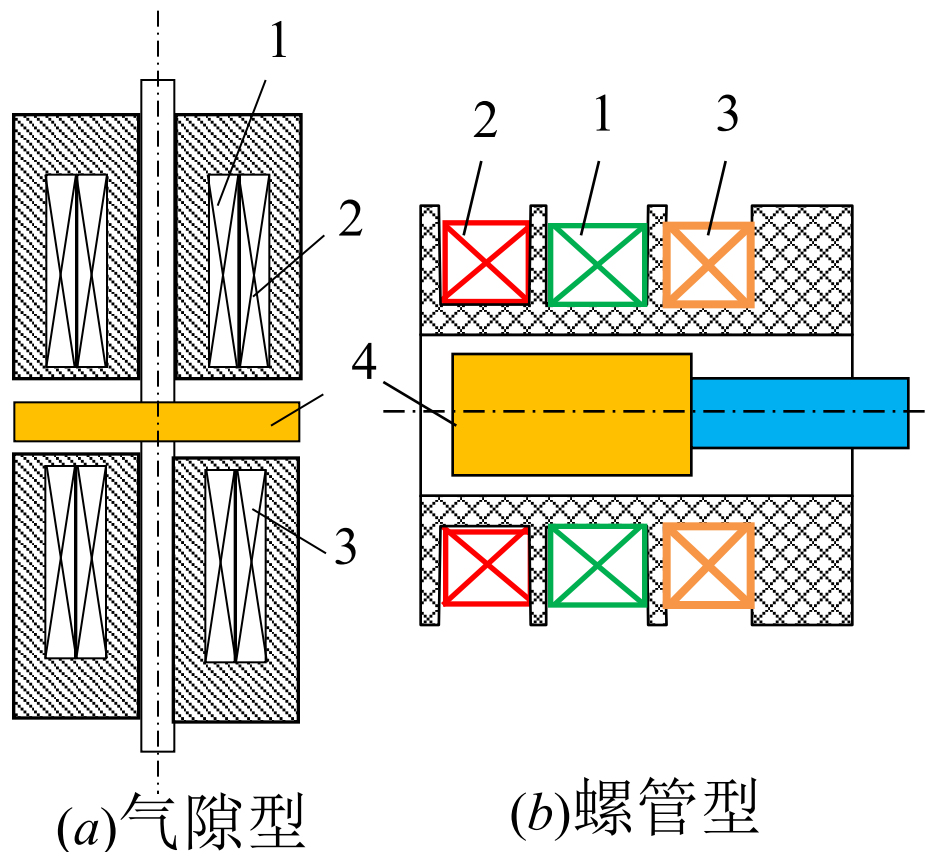
3-线圈 I 与 II 差动自感特性; 4-两线圈差接后电桥电压与位移间的特性曲线

## 二、差动变压器电感式传感器

### (一) 结构原理与等效电路

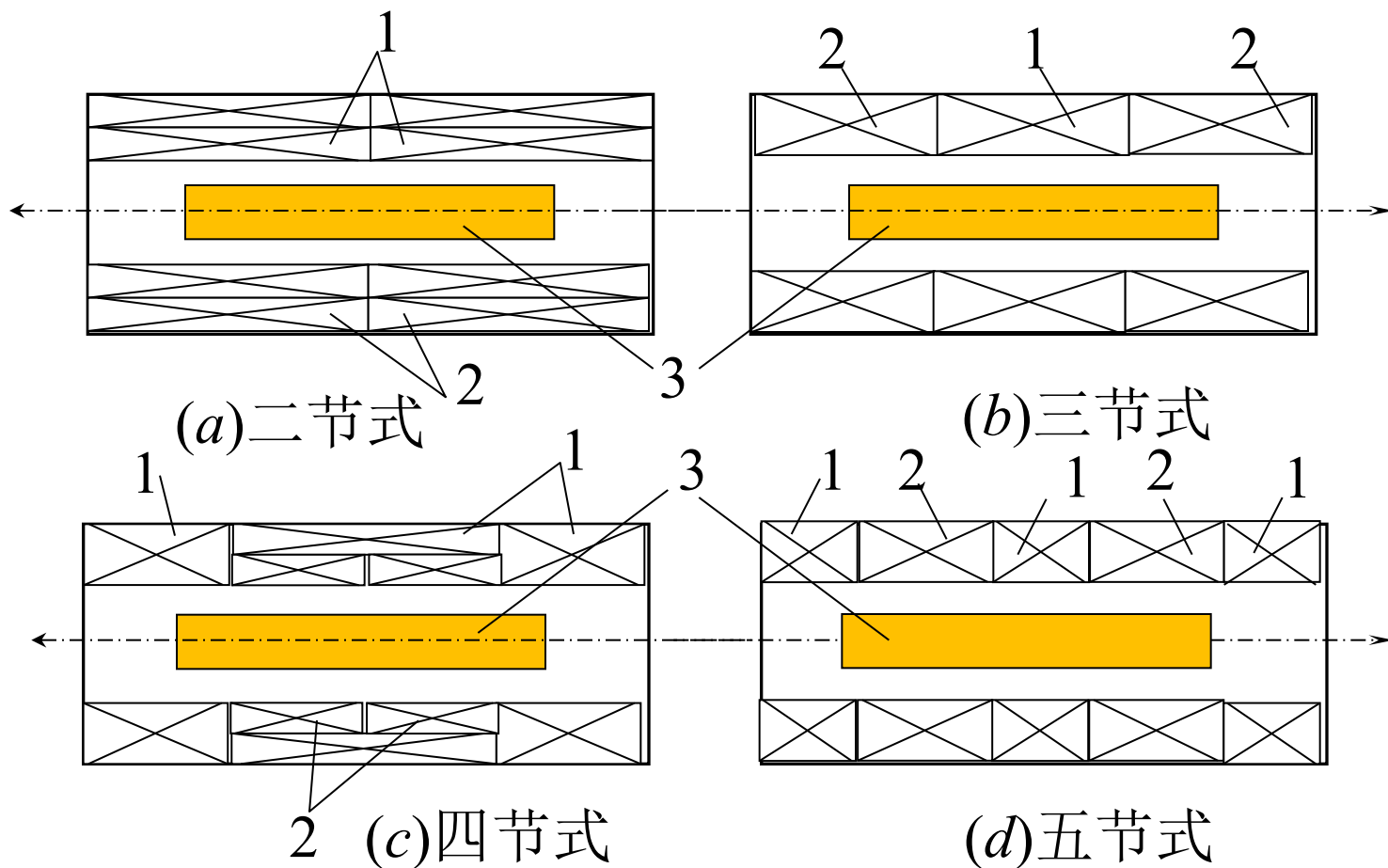
属于互感式电感传感器，分气隙型和差动变压器两种。目前主要采用螺管型差动变压器。

其基本元件有衔铁、初级线圈、次级线圈和线圈框架等。初级线圈作为差动变压器激励使用，相当于变压器的原边，而次级线圈由结构尺寸和参数相同的两个线圈反相串接而成，相当于变压器的副边。螺管形差动变压器根据初、次级排列不同有二节式、三节式、四节式和五节式等形式。



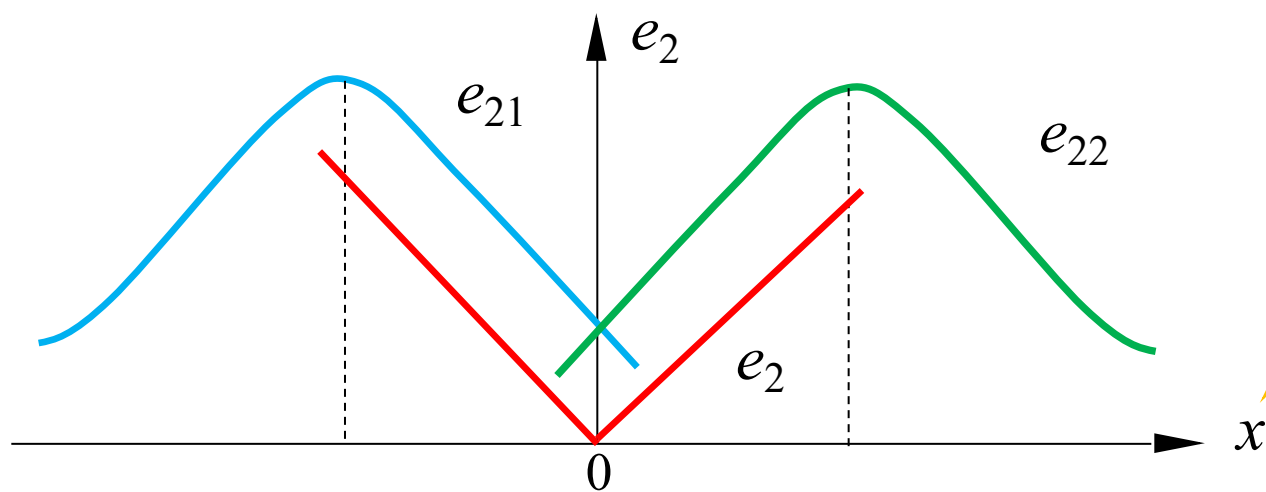
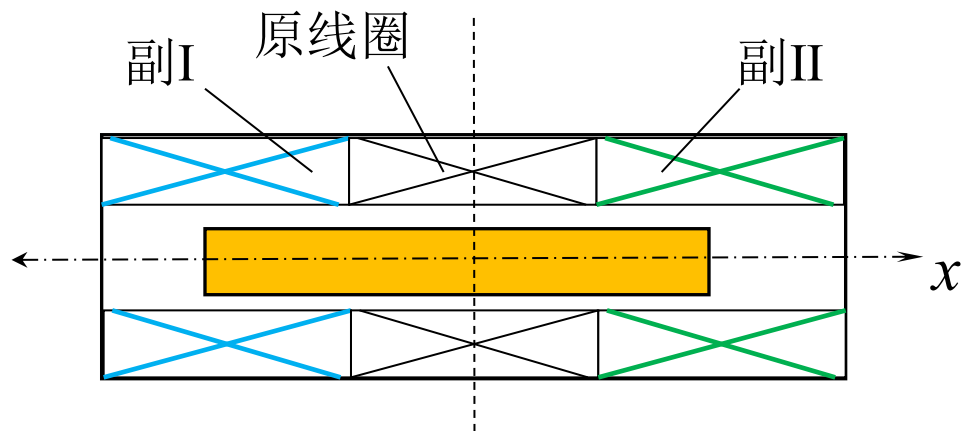
1 初级线圈;2.3次级线圈;4衔铁

三节式的零点电位较小，二节式比三节式灵敏度高、线性范围大，四节式和五节式改善了传感器线性度。



螺管形差动变压器线圈各种排列形式

1 初级线圈；2 次级线圈；3 衔铁



$x$ 表示衔铁偏离中心位置的距离

螺管形差动变压器的输出电势 $e_2$ 与衔铁位移 $x$ 的关系

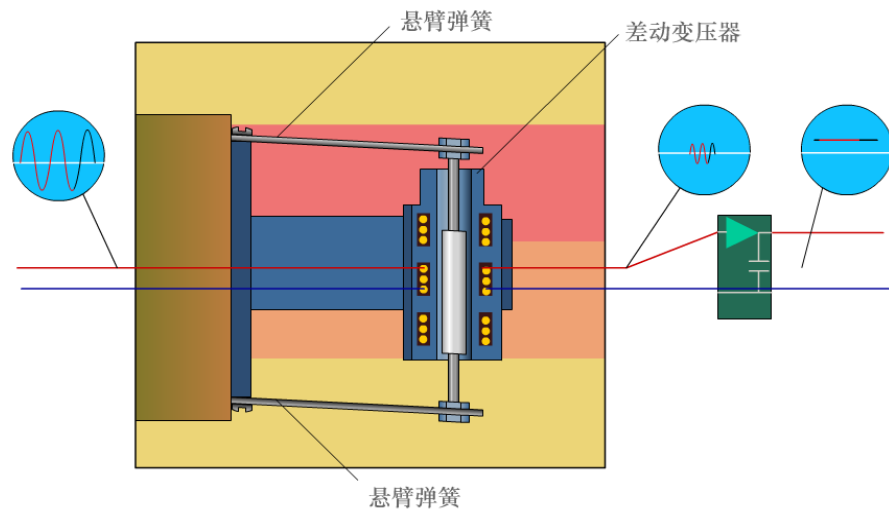
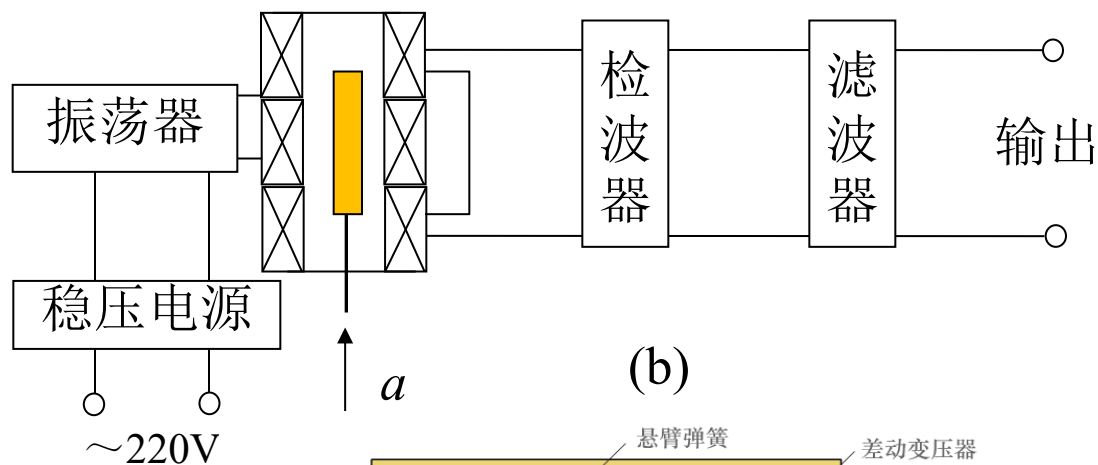
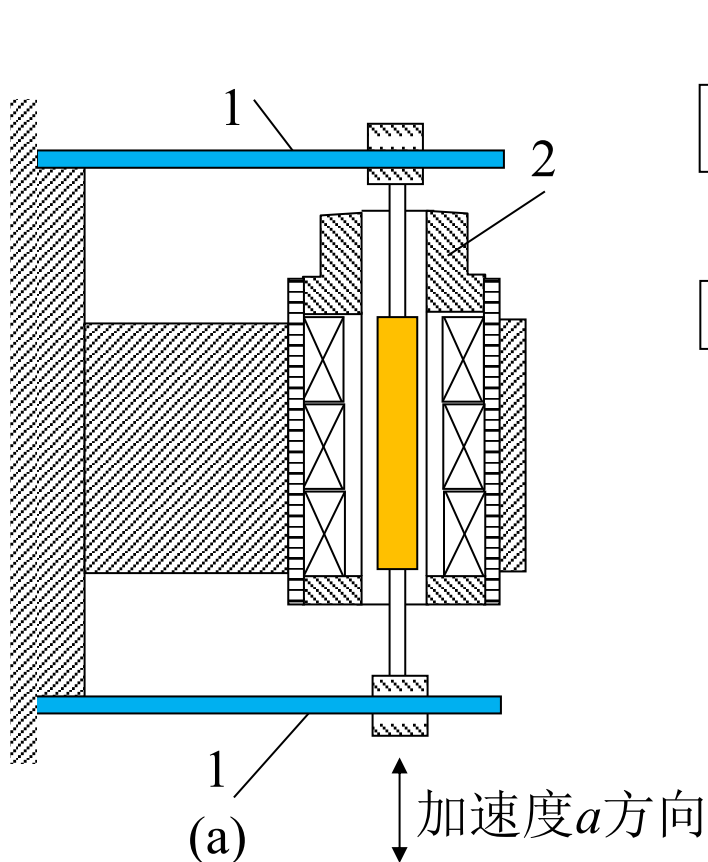


## (二) 应用

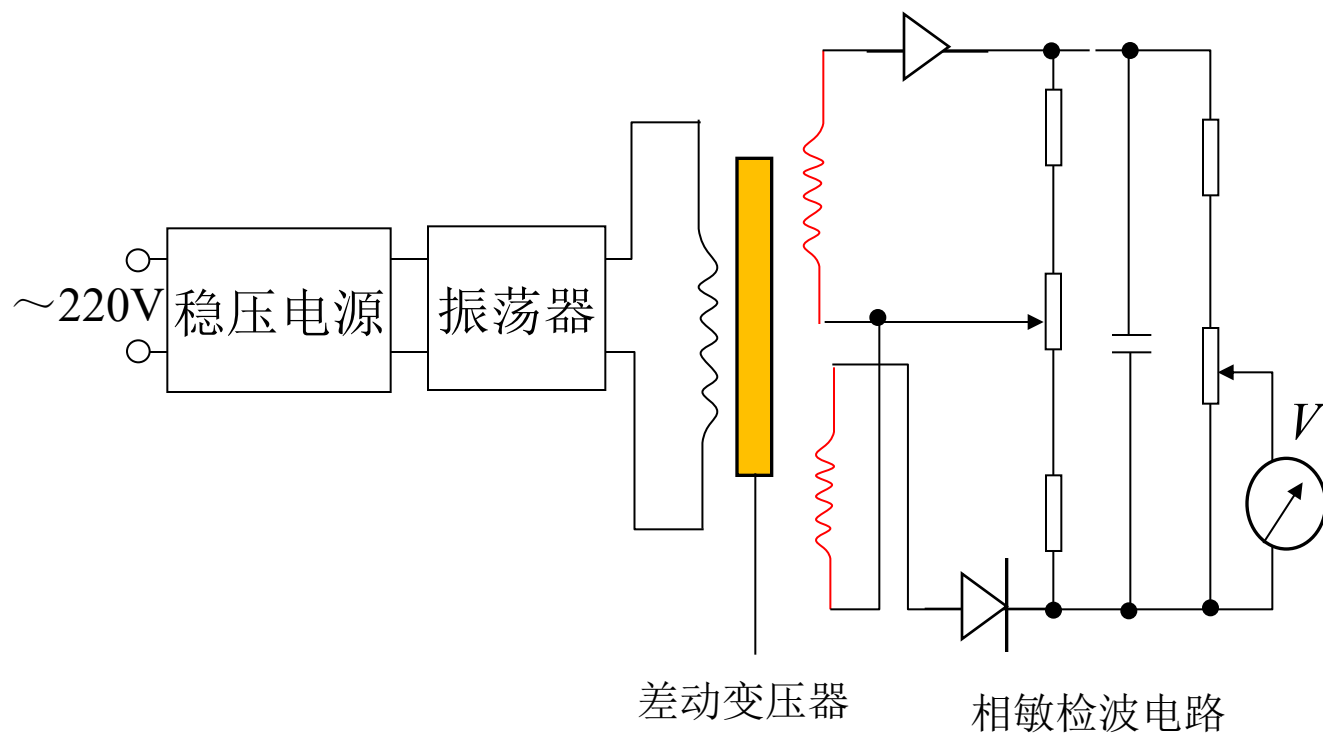
测量**振动**、厚度、应变、压力、加速度等各种物理量。

### 1. 差动变压器式加速度传感器

用于测定振动物体的**频率**和**振幅**时其**激磁频率**必须是**振动频率**的十倍以上，才能得到精确的测量结果。可测量的振幅为 $(0.1 \sim 5)\text{mm}$ ，振动频率为 $(0 \sim 150)\text{Hz}$ 。

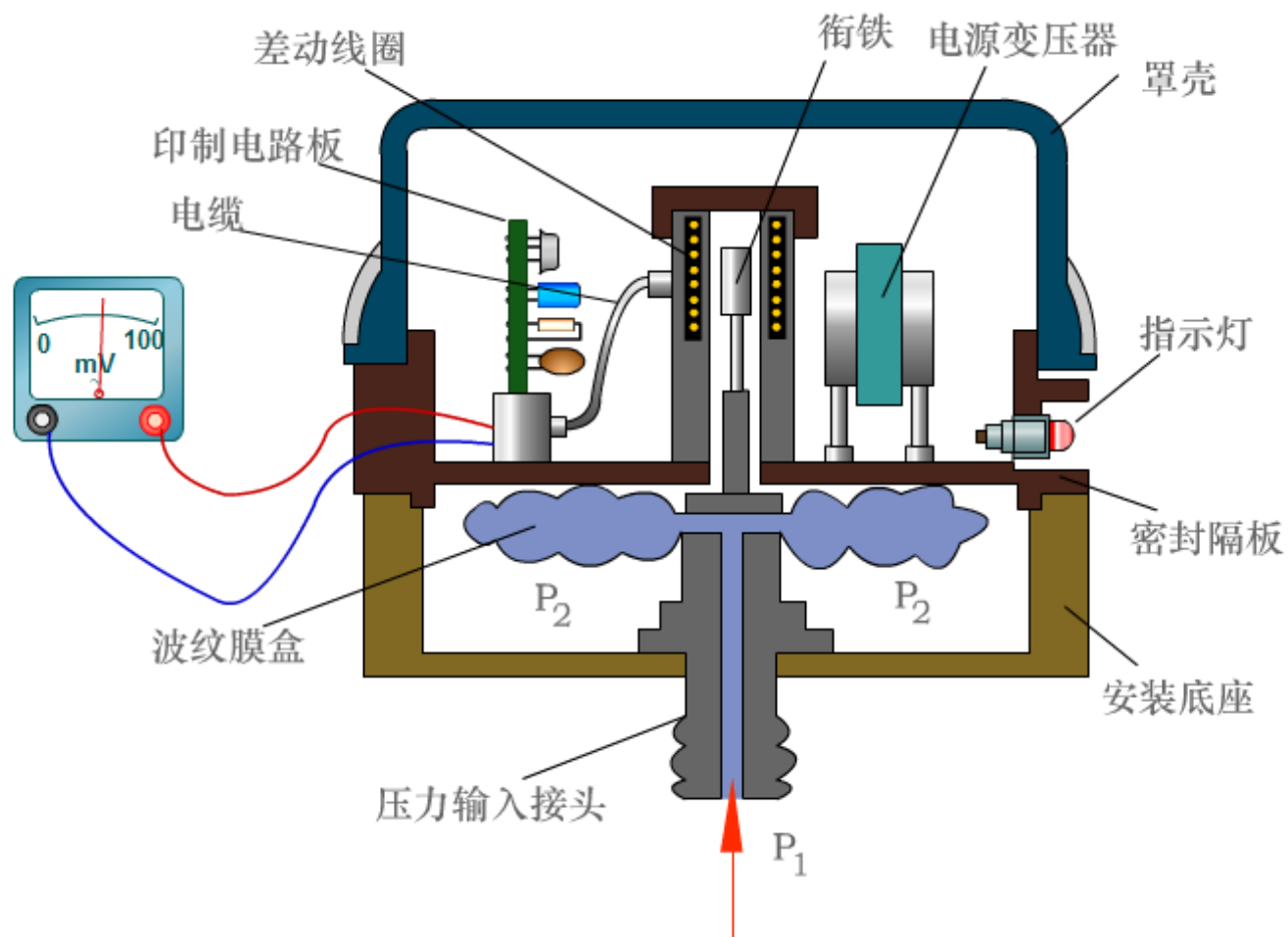


将差动变压器和弹性敏感元件（膜片、膜盒和弹簧管等）相结合，可以组成各种形式的压力传感器。

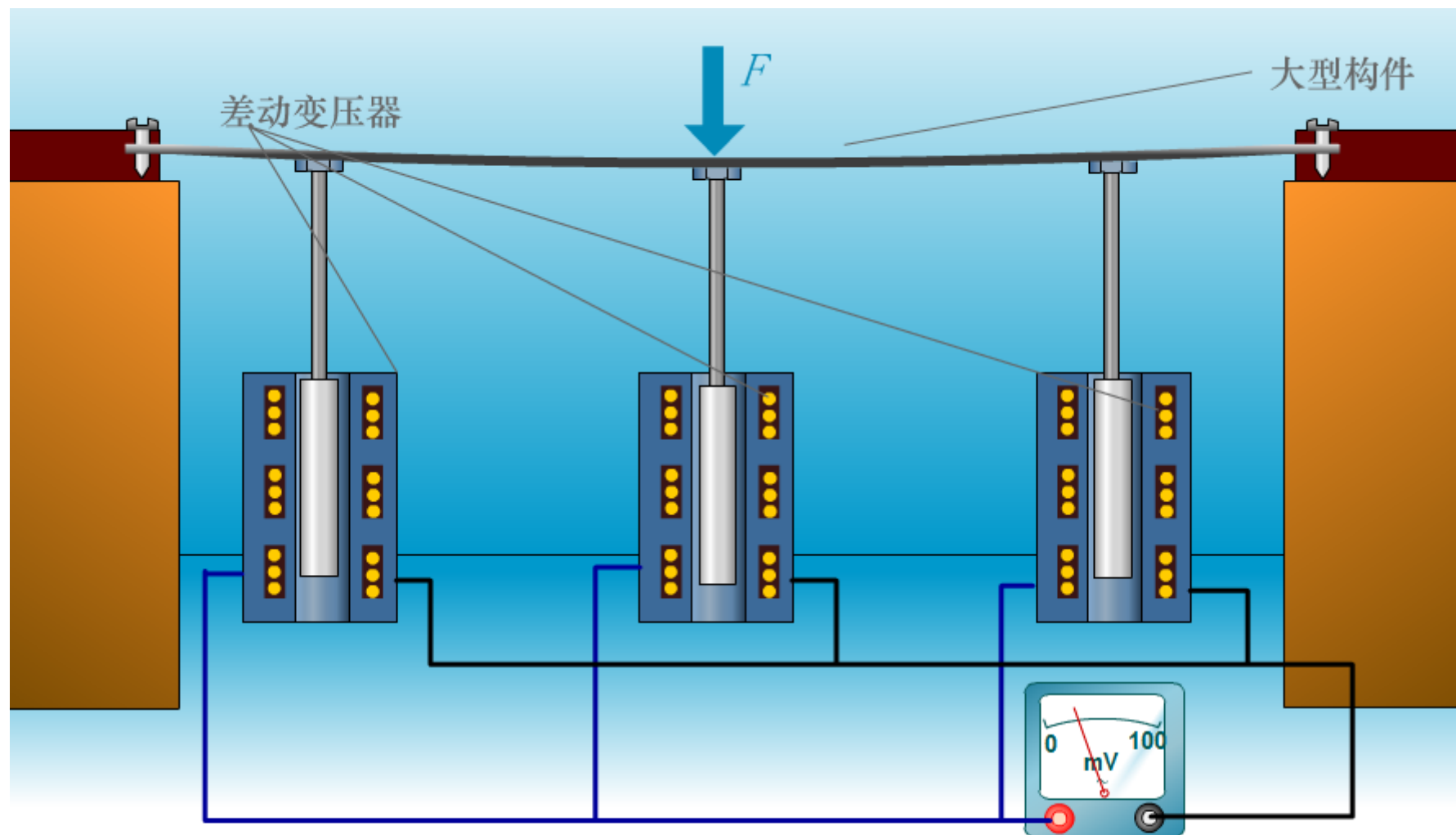


这种变送器可分档测量  $(-5 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5) \text{ N/m}^2$  压力，输出信号电压为  $(0 \sim 50) \text{ mV}$ ，精度为1.5级。

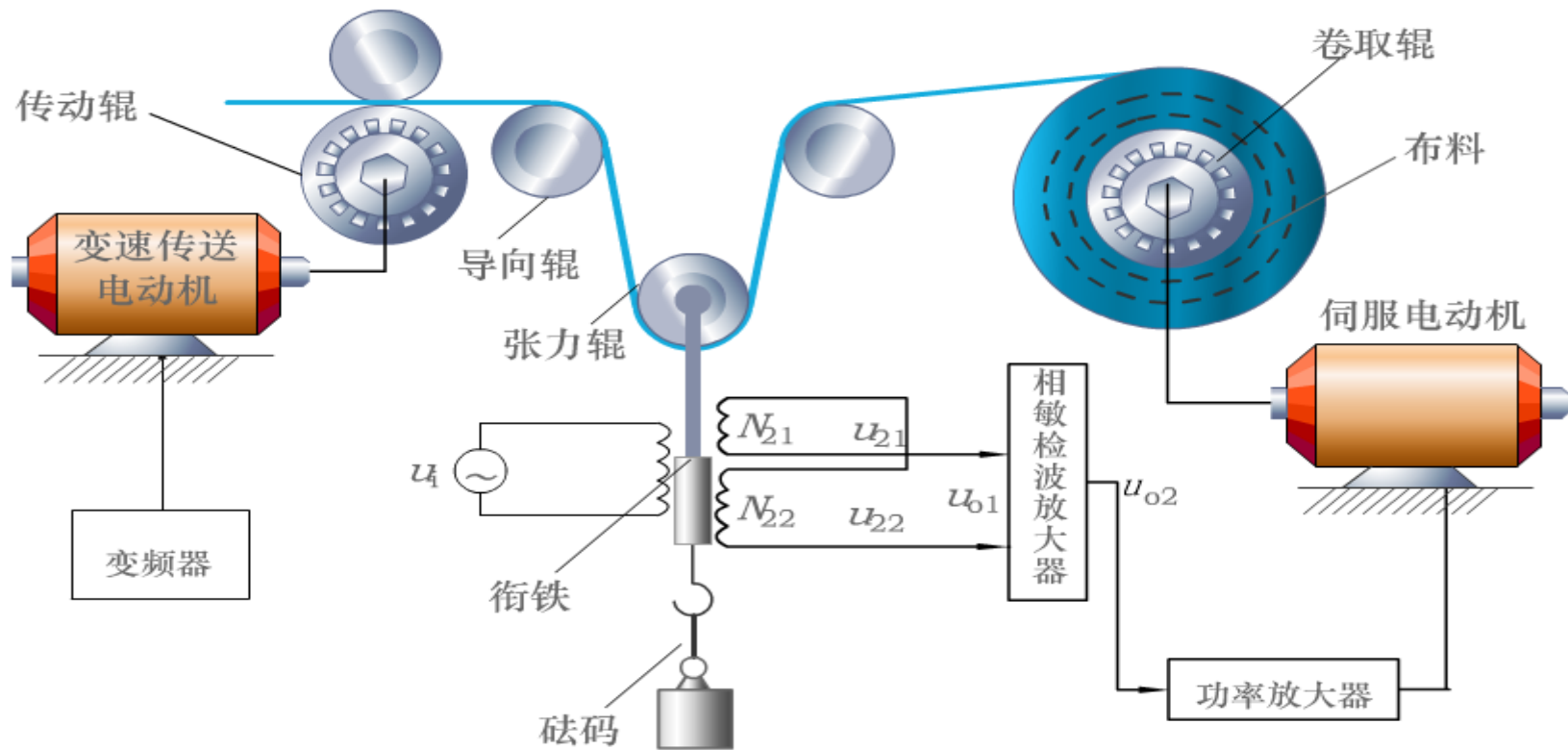
## 2. 微压力变送器



差动压力变送器



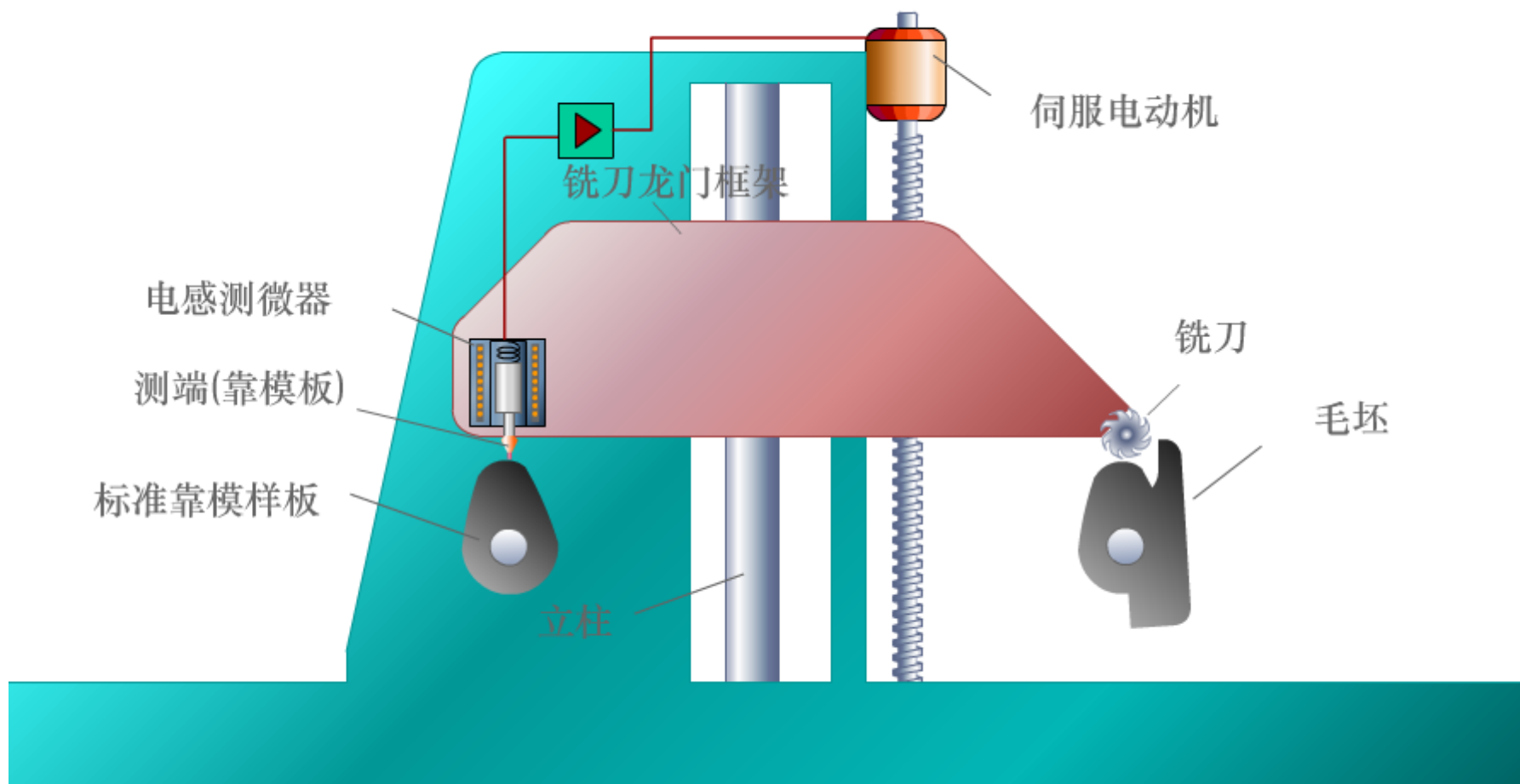
差动传感器测量大型构件的应力和位移



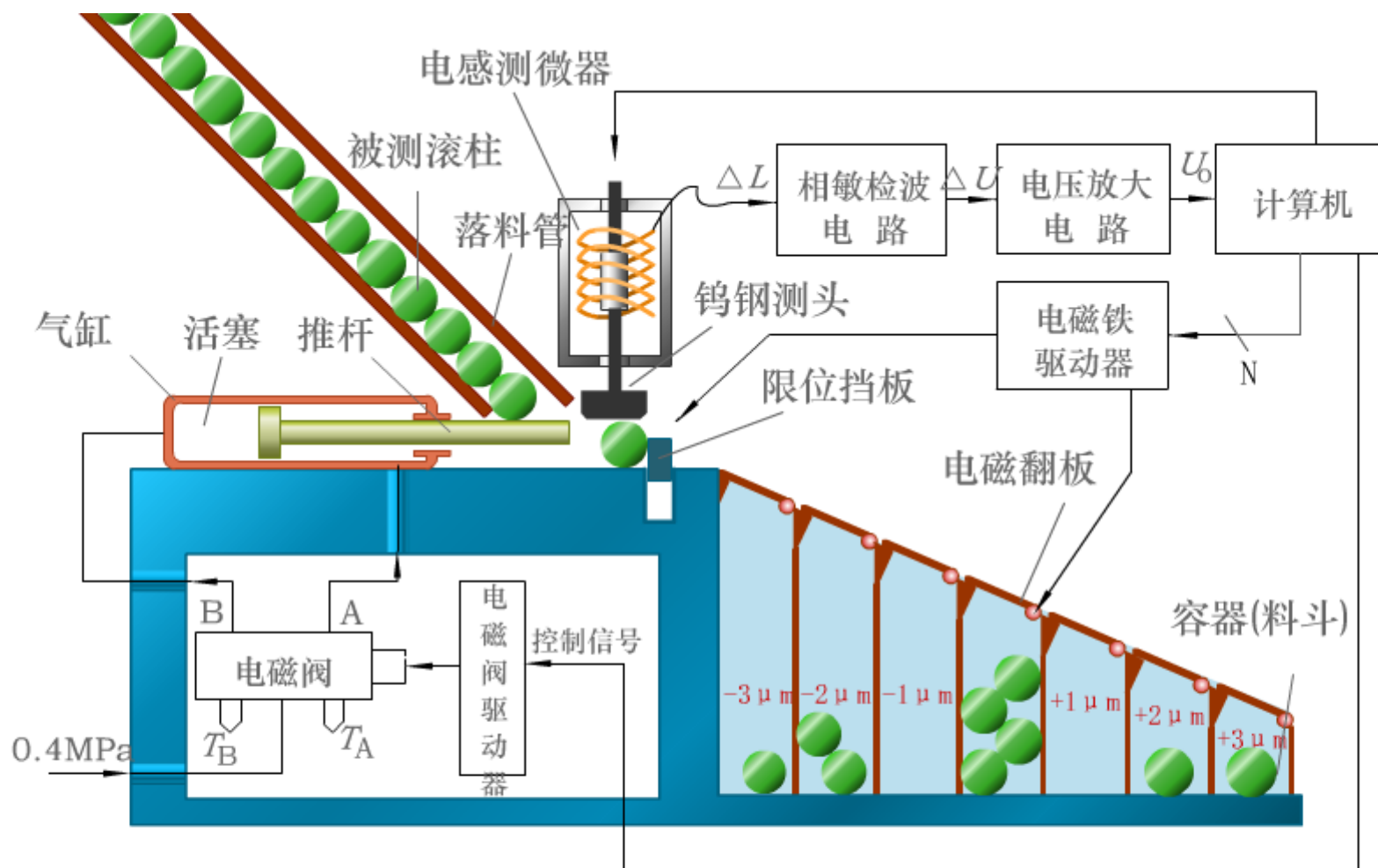
差动变压器式张力测量控制系统

东方仿真COPYRIGHT

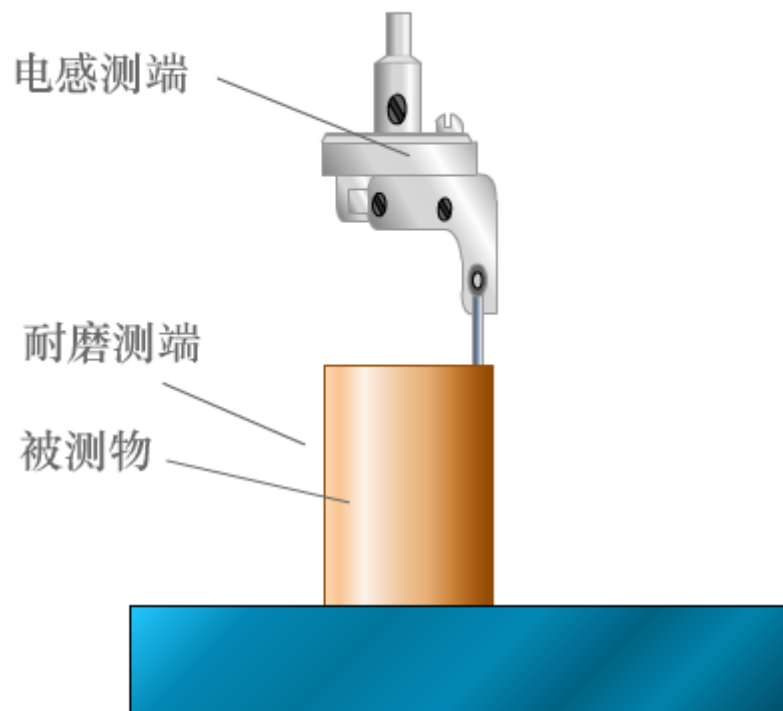
**张力辊**是使驱动装置作用在其上的**扭矩**通过**辊面与带材间的摩擦**转化为**带材**张力的，张力辊的数目和布置形式取决于**带材**所需的最大拉伸力和场地条件。张力辊组一般又分为入口张力辊组和出口张力辊组，再者既可由电机或液压马达单独驱动亦可通过齿轮差动装置互联，但不论驱动装置如何不同，其根本目的都是要造成入口带与出口带的速差，由此产生带动所需的张力。



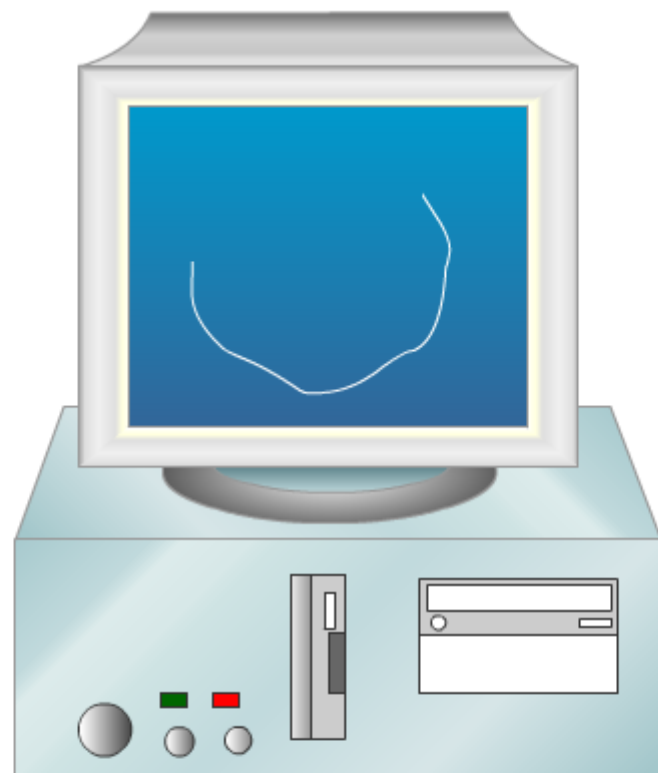
电感传感器在仿型机床中的应用



电感式滚柱直径分选装置



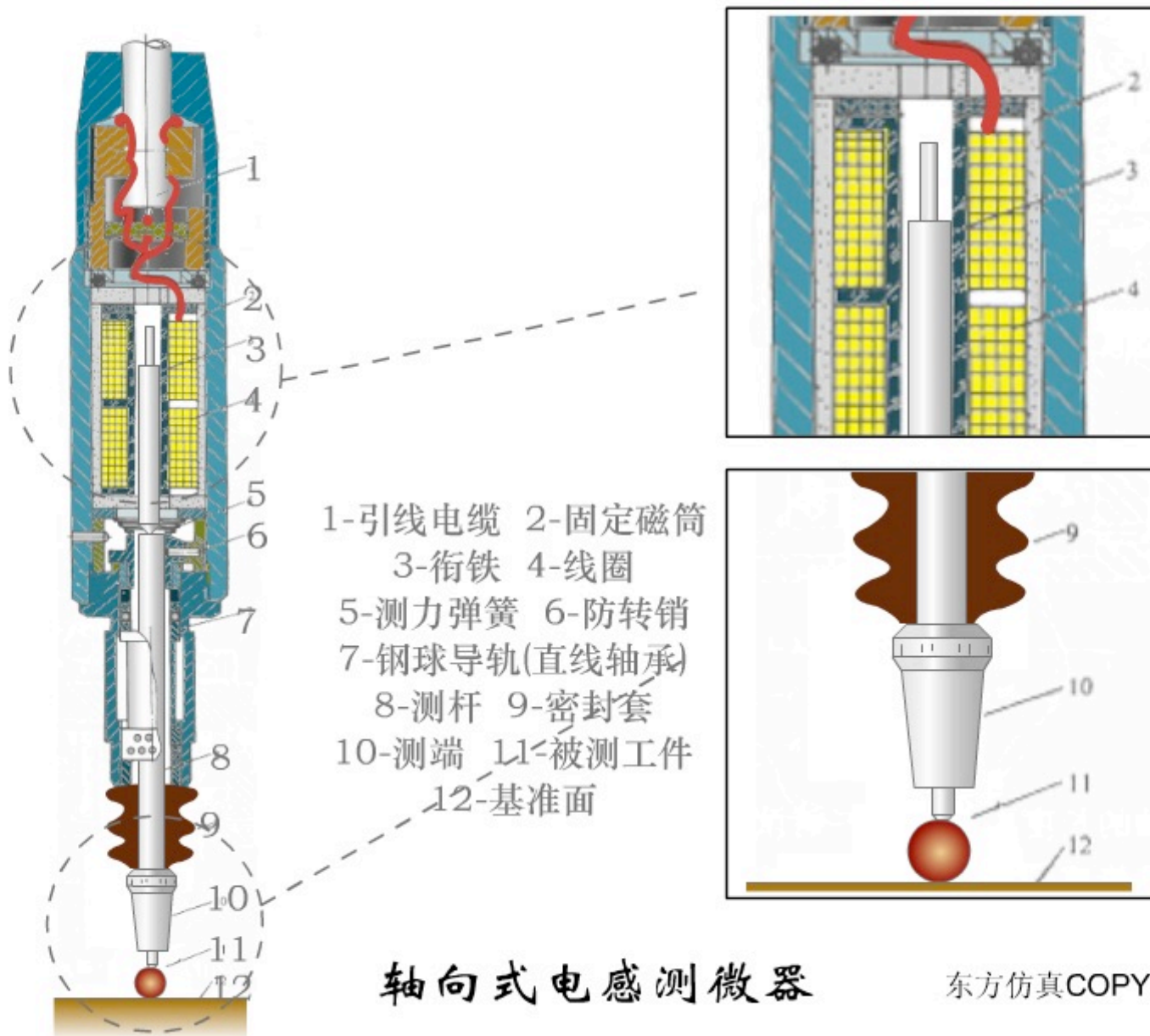
a)测量装置



b)计算机处理过的结果

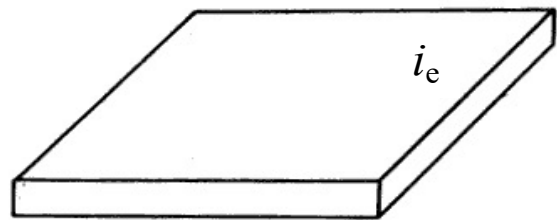
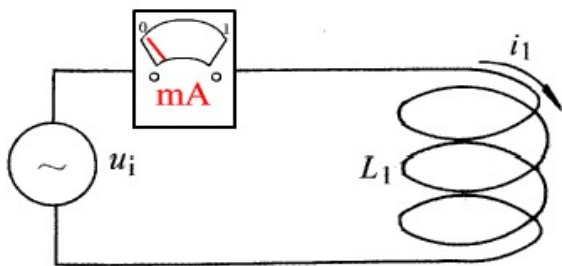
## 电感式圆度计





### 三、电涡流式传感器

**电涡流传感器的基本原理：**传感器线圈由**高频信号激励**，使它产生一个**高频交变磁场**  $\phi_1$ ，当被测**导体靠近线圈**时，在磁场作用范围的**导体表层**，产生了与此磁场相交链的**电涡流**  $i_e$ ，而此电涡流又将产生一交变磁场  $\phi_e$  阻碍外磁场的变化。从能量角度来看，在被测导体内存在着**电涡流损耗** (当频率较高时，忽略磁损耗)。能量损耗使传感器的  $Q$  值 (电感线圈的品质因数) 和等效阻抗  $Z$  降低，因此当被测体与传感器间的**距离**  $d$  改变时，传感器的  $Q$  值和等效阻抗  $Z$ 、**电感**  $L$  均发生变化，于是把**位移量** 转换成**电量**。



当导体置于**交变磁场**或在**磁场**中运动时，导体上引起**感生电流**  $i_e$ ，此电流在导体内闭合，称为**涡流**。涡流大小与**导体电阻率**  $\rho$ 、**磁导率**  $\mu$  以及产生交变磁场的线圈与被测体之间**距离**  $x$ 、线圈激励电流的**频率**  $f$  有关。显然磁场变化频率愈高，涡流的**集肤效应** 愈显著，即涡流穿透深度愈小，其穿透深度  $h$  可表示为：

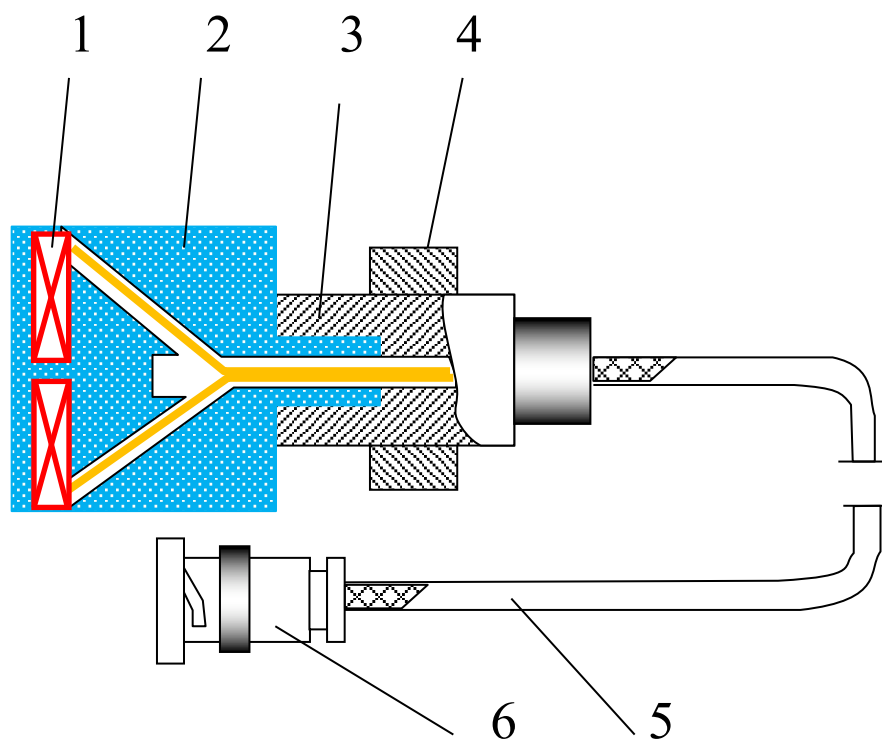
$$h = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

$\rho$ —导体电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );  
 $\mu_r$ —导体相对磁导率;  
 $f$ —交变磁场频率 (Hz)。

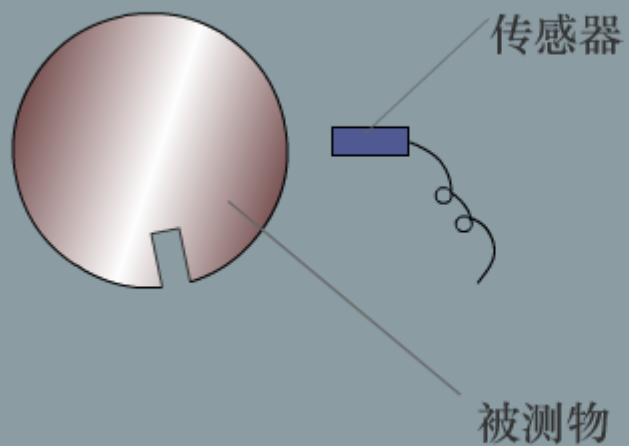
可见，涡流穿透**深度**  $h$  和**激励电流频率**  $f$  有关，所以涡流传感器根据激励频率分为：**高频反射式**或**低频透射式**两类。属于**自感式传感器**。目前高频反射式电涡流传感器应用广泛。

## (一) 结构和工作原理

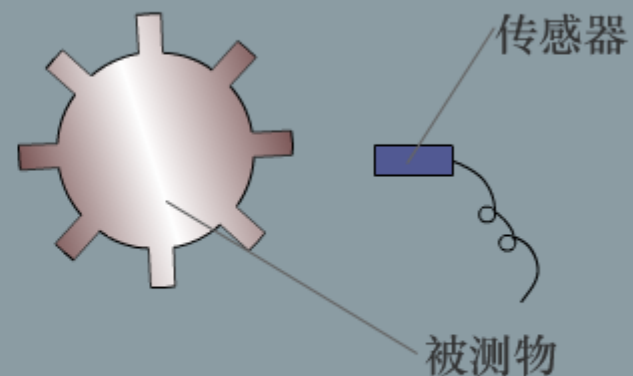
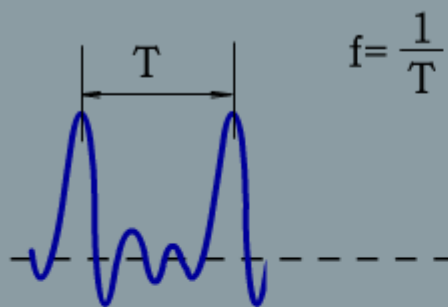
\* **电涡流式传感器** 主要由一个安置在框架上的扁平圆形线圈构成。此线圈可以粘贴于框架上，或在框架上开一条槽沟，将导线绕在槽内。下图为CZF1型涡流传感器的结构原理，它采取将导线绕在**聚四氟乙烯**框架窄槽内，形成线圈的结构方式。



1 线圈 2 框架 3 衬套  
4 支架 5 电缆 6 插头

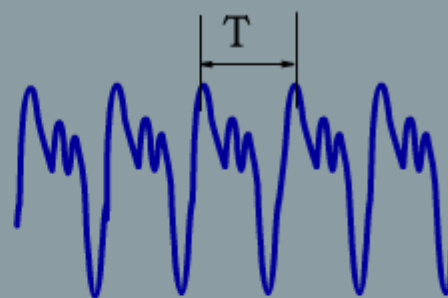


(a)带有凹槽的转轴及输出波型

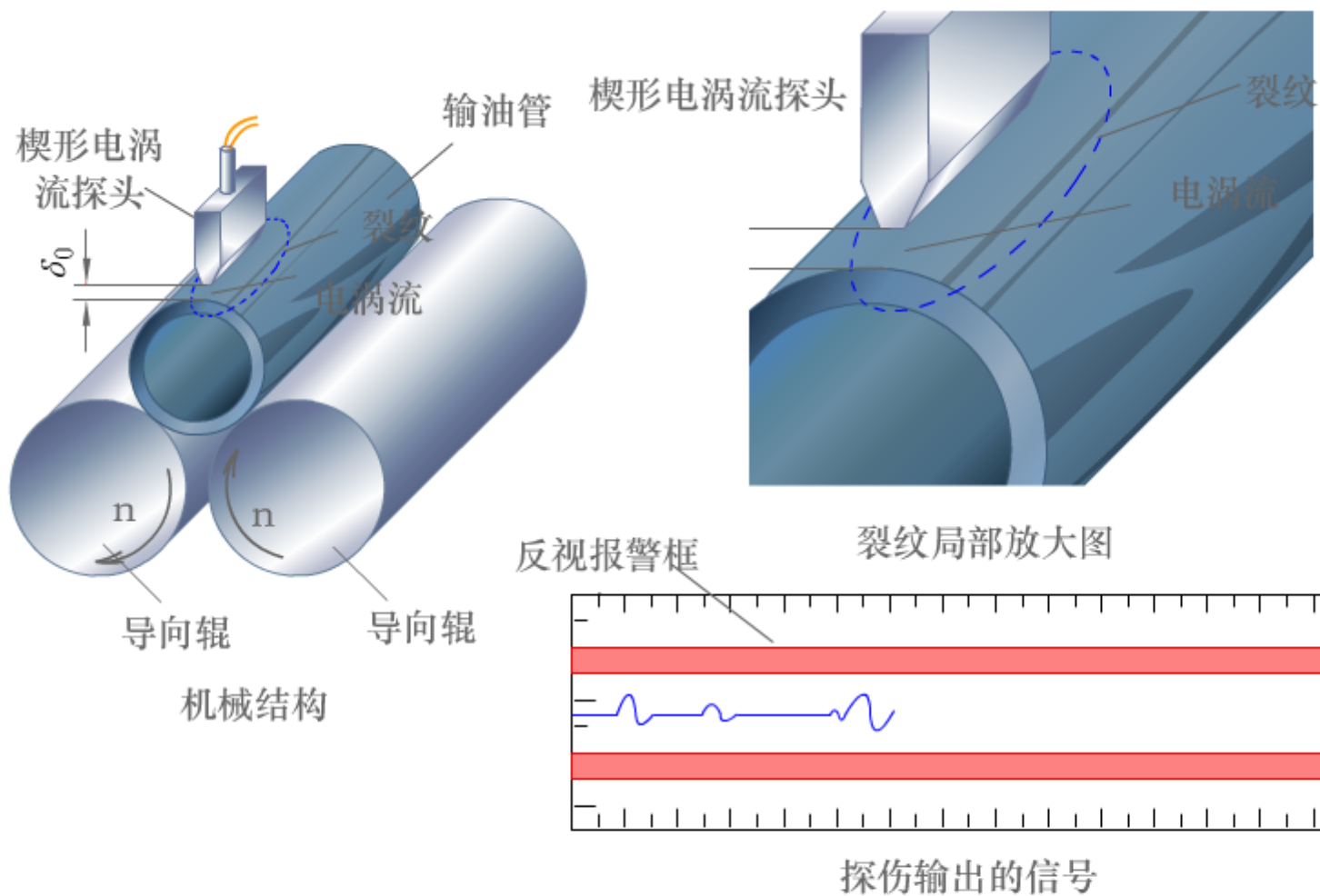


(b)带有凸槽的转轴及输出波型

$$n = 60 \frac{f}{Z}$$

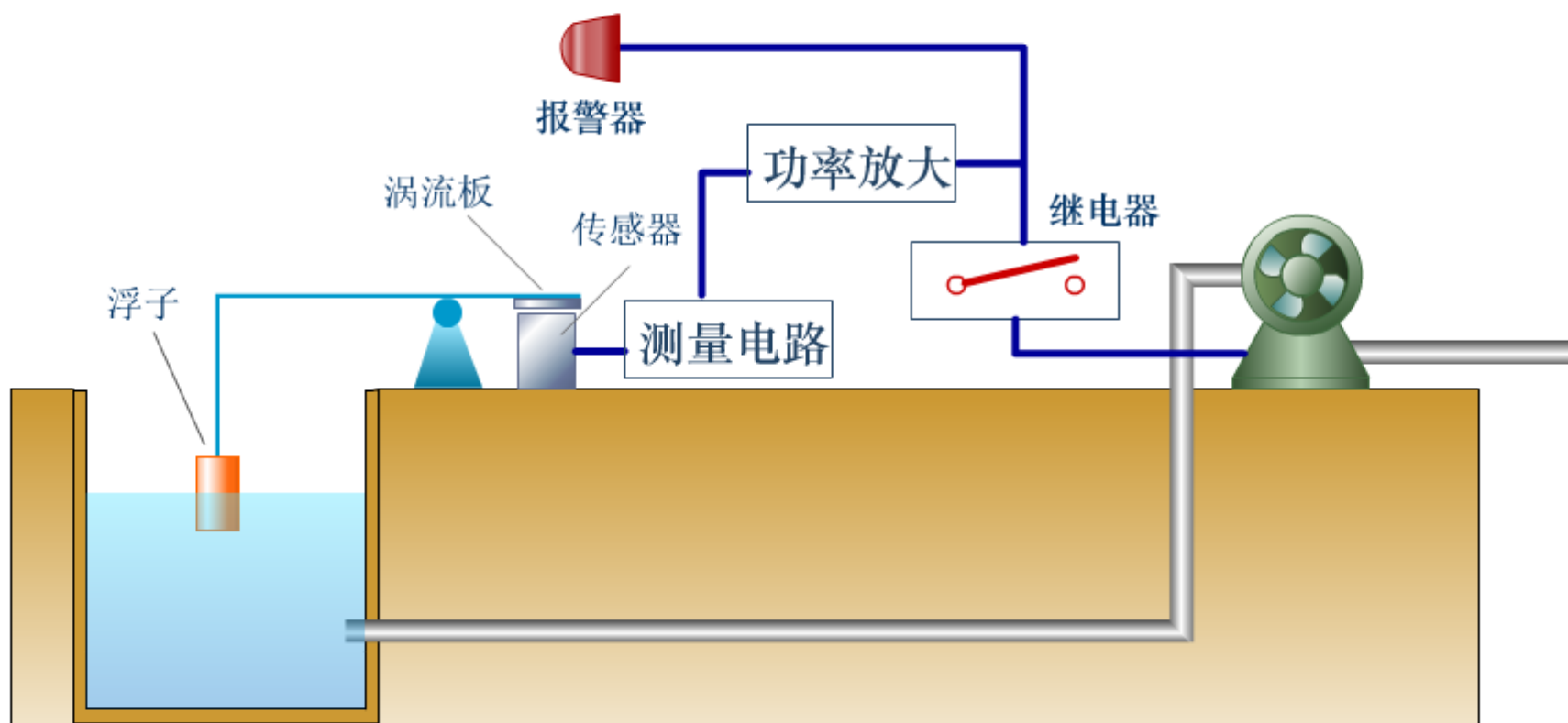


转速的测量



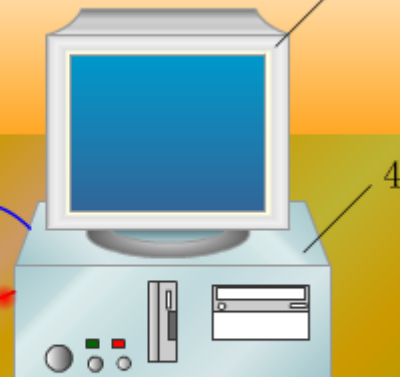
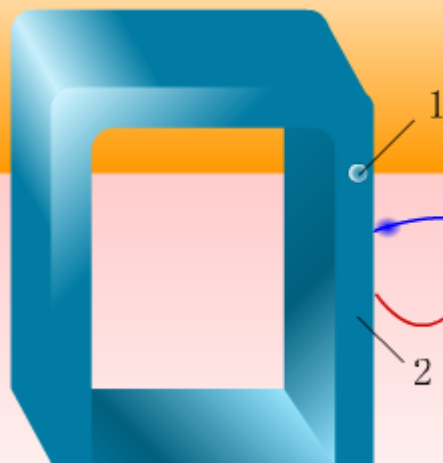
## 电涡流表面的探伤

东方仿真COPYRIGHT

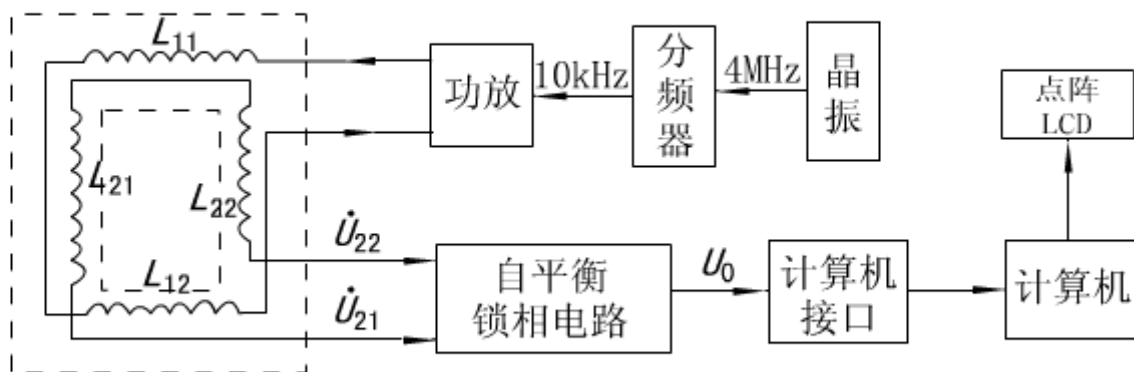


电涡流式传感器测量位移

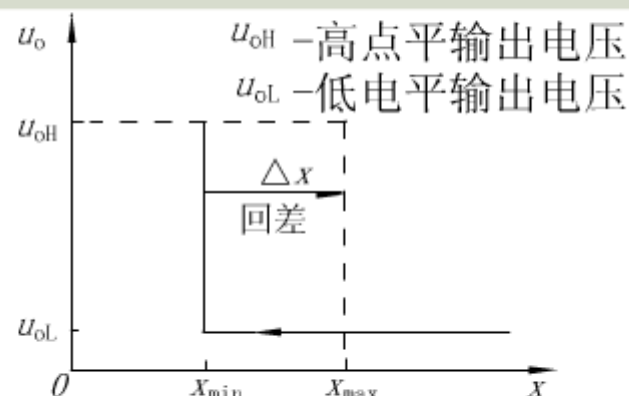
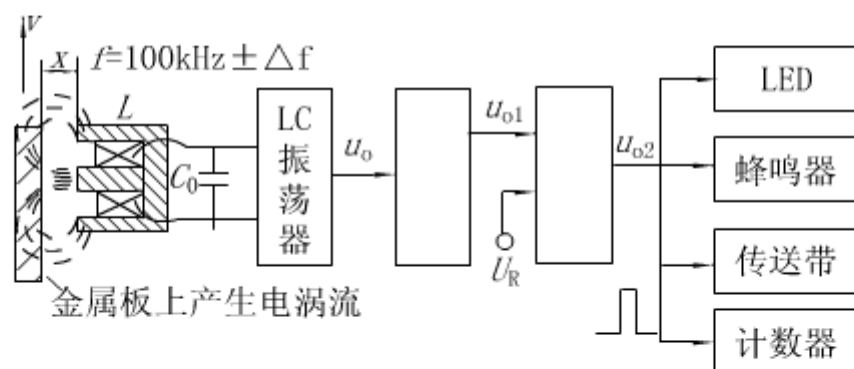
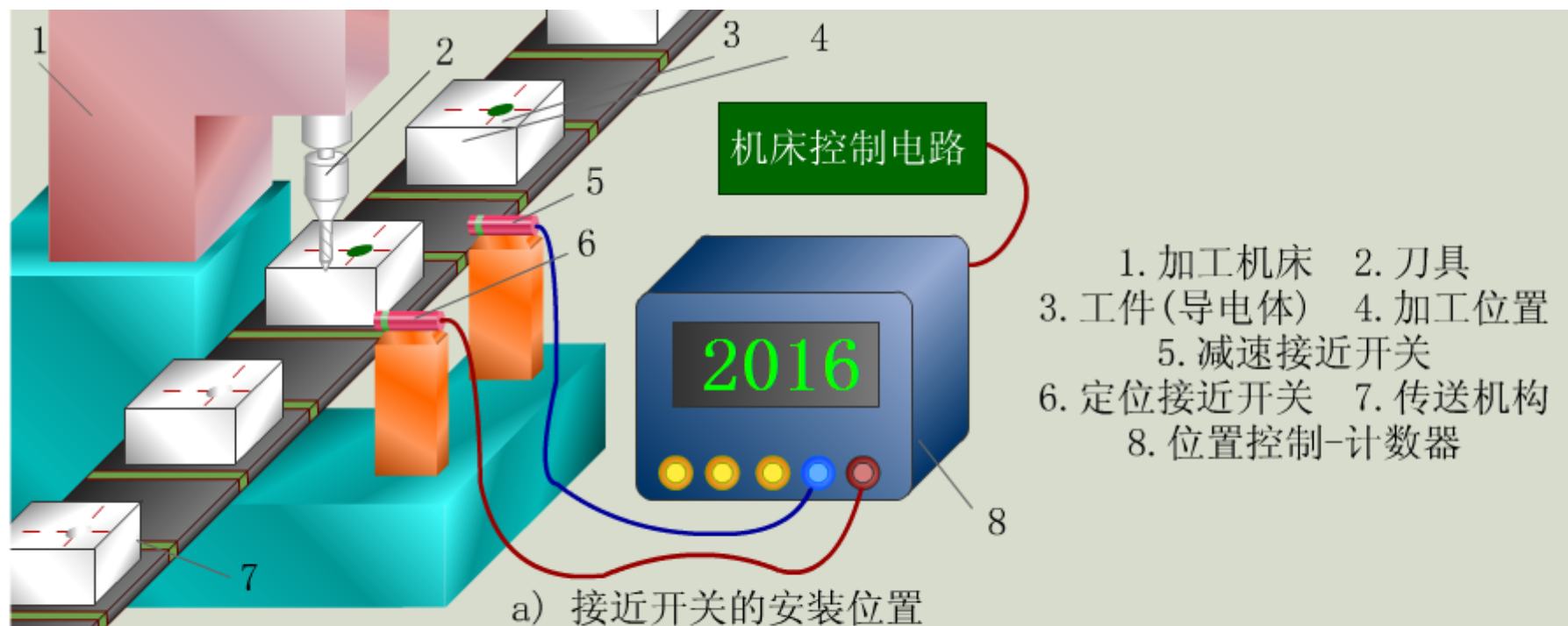
选择你要携带的物品▼



电涡流式安全门检查演示 1. 报警指示灯 2. 内藏式电涡流线圈 3. 液晶彩显 4. X光及中子探测器图象处理系统

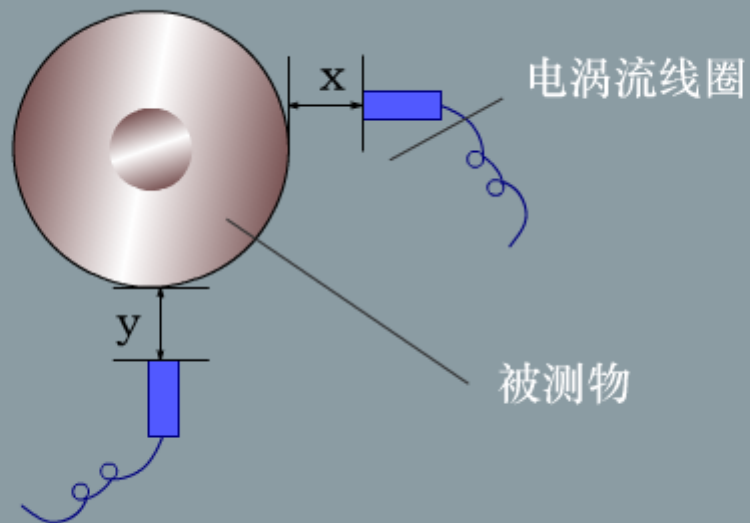


电涡流式通道安全检查门电原理

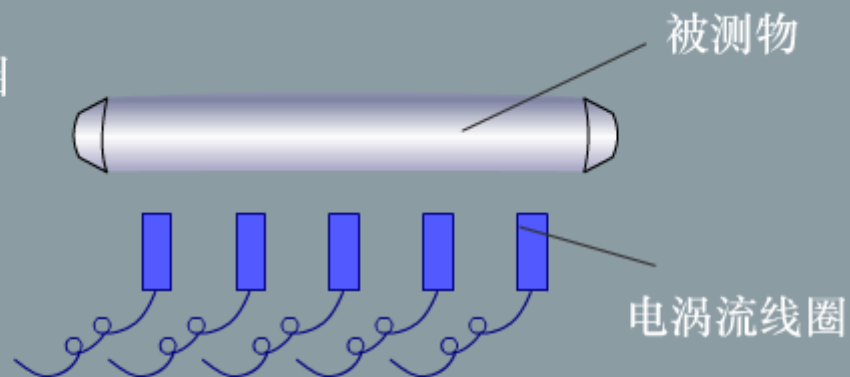


## 工件的定位与计数的原理

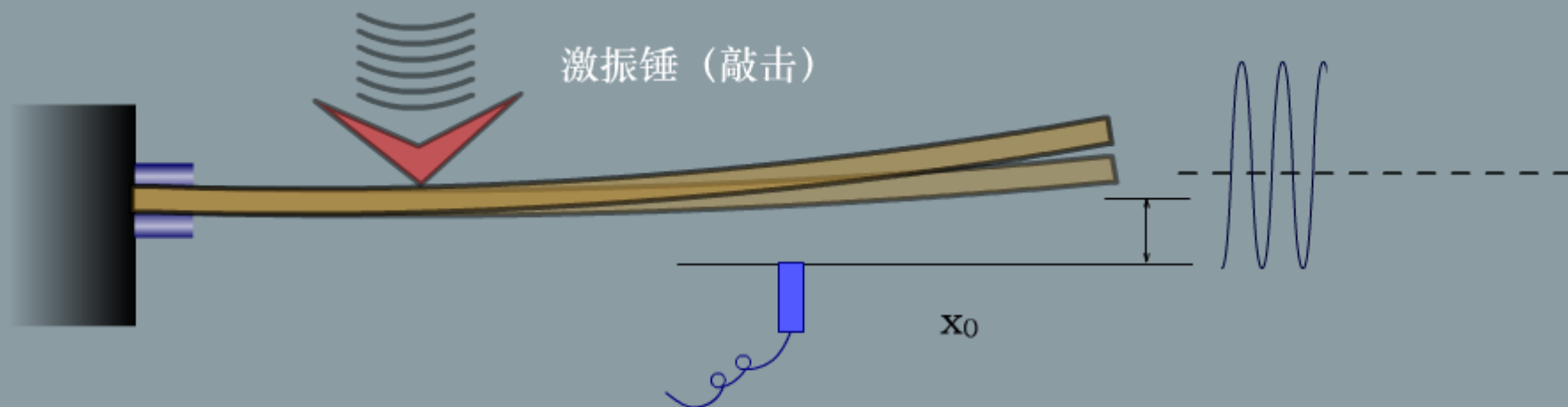




(a) 径向振动测量



(b) 长轴多线圈测量



(c) 叶片振动测量

## 振幅测量的原理