

第一节 应变、应力的测量

应用电阻应变片和应变仪测定构件的表面应变，然后再根据应变与应力的关系式，确定构件表面应力状态是一种最常见的实验应力分析方法。

根据被测应变的性质和工作频率的不同，可采用不同的应变仪。静态载荷作用下的应变，以及变化十分缓慢或变化后能很快稳定下来的应变，可采用**静态电阻应变仪**。以静态应变测量为主，兼作200Hz以下的低频动态测量可采用静动态电阻应变仪。测量0~2000Hz范围的动态应变，采用**动态电阻应变仪**；这类应变仪通常具有4~8个通道。测量0~20000Hz的动态过程和爆炸、冲击等瞬态变化过程，则采用**超动态电阻应变仪**。

我国目前生产的电阻应变仪大多采用调幅放大电路，一般由**电桥、前置放大器、功率放大器、相敏检波器、低通滤波器、振荡器、稳压电源**等单元组成。

一、应变仪的电桥特性

应变仪中多采用**交流电桥**，电源以载波频率供电，四个桥臂均为电阻，由可调电容来平衡分布电容，但基本公式与直流电桥具有相似的形式。

$$U_y = U_{ab} - U_{ad} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_0$$

第一节 应变、应力的测量

初始状态电桥的各臂阻值相等，且考虑到 $\Delta R \ll R$ ，则上式可写成(忽略 ΔR 高次项)：

$$u_y = \frac{u_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right)$$

当各桥臂应变片的灵敏度 S_g 相同时，上式可改写为

$$u_y = \frac{u_0}{4} S_g (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

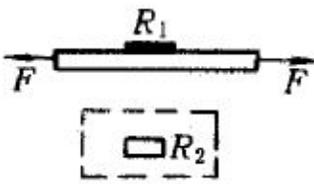
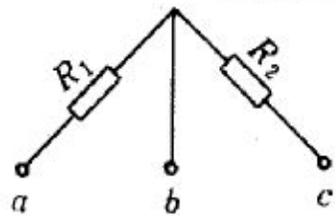
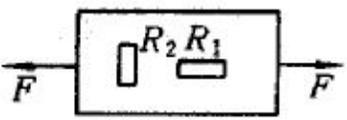
工作方式	单臂	双臂	四臂
应变片所在桥臂	R_1	R_1, R_2	R_1, R_2, R_3, R_4
输出电压 u_y	$\frac{1}{4} u_0 S_g \varepsilon$	$\frac{1}{2} u_0 S_g \varepsilon$	$u_0 S_g \varepsilon$

二、应变片的布置和接桥方法

应变片的布置和电桥连接应根据测量的目的、对载荷分布的估计而定。在测量复合载荷作用下的应变时，还应利用应变片的布置和接桥方法来消除相互影响的因素。表8-2列举了轴向拉伸（压缩）载荷下应变测量时应变片的布置和接桥方法。从表中清楚看到不同的布置和接桥方法对灵敏度、温度补偿情况和消除弯矩影响是不同的。一般应优先选用输出信号大、能实现温度补偿、粘贴方便和便于分析的方案。

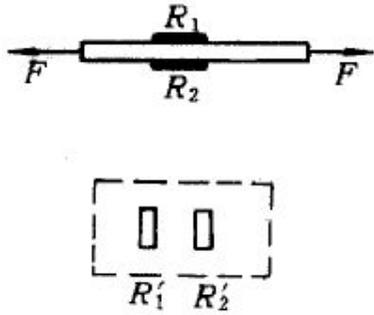
第一节 应变、应力的测量

表 8-2 轴向拉伸(压缩)载荷下布片、接桥组合图例

序号	受力状态简图	应变片的数量	电桥组合型式		温度补偿情况	电桥输出电压	测量项目及应变值	特点
			电桥型式	电桥接法				
1		2	半桥式		另设补偿片	$u_y = \frac{1}{4} u_0 S_g \epsilon$	拉(压)应变 $\epsilon = \epsilon_i$	不能消除弯矩的影响
2		2	桥式		互为补偿	$u_y = \frac{1}{4} u_0 S_g \epsilon (1 + \nu)$	拉(压)应变 $\epsilon = \frac{\epsilon_i}{(1 + \nu)}$	输出电压提高到(1+ν)倍,不能消除弯矩的影响

表中符号说明： S_g -应变片的灵敏度； u_0 -供桥电压； ν -被测件的泊松比； ϵ_i -应变仪测读的应变值，即指示应变； ϵ -所要测量的机械应变值。

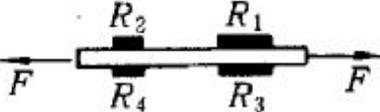
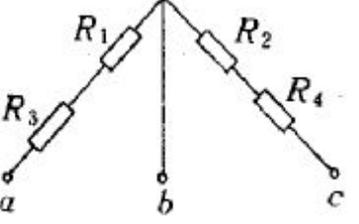
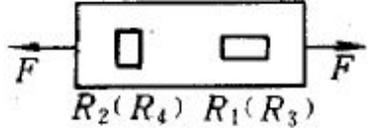
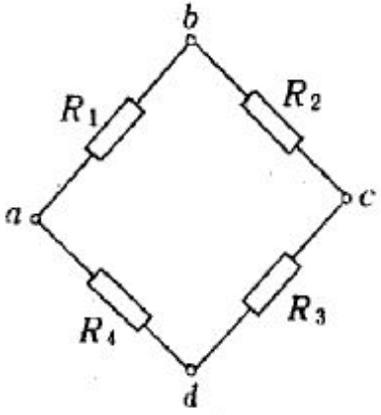
第一节 应变、应力的测量

	4	半桥式	另设补偿片	$u_y = \frac{1}{4} u_0 S_g \epsilon$	拉(压)应变 $\epsilon = \epsilon_i$	可以消除弯矩的影响
4	4	全桥式	补偿片	$u_y = \frac{1}{2} u_0 S_g \epsilon$	拉(压)应变 $\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2}$	输出电压提高一倍, 且可消除弯矩的影响

表中符号说明： S_g -应变片的灵敏度； u_0 -供桥电压； ν -被测件的泊桑比； ϵ_i -应变仪测读的应变值，即指示应变； ϵ -所要测量的机械应变值。

第一节 应变、应力的测量

(续)

序号	受力状态简图	应变片的数量	电桥组合型式		温度补偿情况	电桥输出电压	测量项目及应变值	特点
			电桥型式	电桥接法				
5		4	半桥式		互为补偿	$u_y = \frac{1}{4} u_0 S_g \epsilon (1 + \nu)$	拉(压)应变 $\epsilon = \frac{\epsilon_i}{1 + \nu}$	输出电压提高到 $(1 + \nu)$ 倍, 且能消除弯矩影响
6		4	全桥式			$u_y = \frac{1}{2} u_0 S_g \epsilon (1 + \nu)$	拉(压)应变 $\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2(1 + \nu)}$	输出电压提高到 $2(1 + \nu)$ 倍, 能消除弯矩影响

表中符号说明： S_g -应变片的灵敏度； u_0 -供桥电压； ν -被测件的泊桑比； ϵ_i -应变仪测读的应变值，即指示应变； ϵ -所要测量的机械应变值。

第一节 应变、应力的测量

三、在平面应力状态下主应力的测定

在实际工作中，常常需要测量一般平面应力场内的主应力，其主应力方向可能是已知的或未知的。

(一) 已知主应力方向 $\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$ $\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$

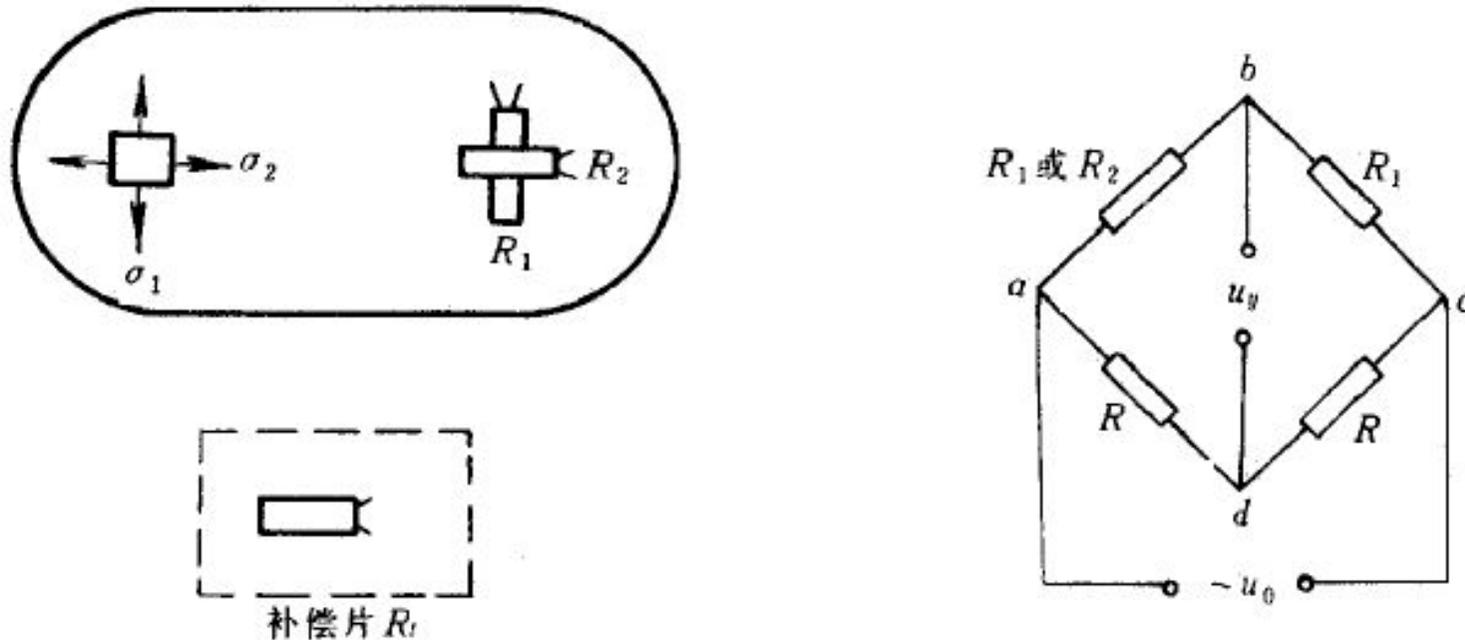


图 8-1 用半桥单点测量桥测量主应变

第一节 应变、应力的测量

(二) 主应力方向未知

一般采取贴应变花的办法来进行测量。对于平面应力状态，如能测出某点三个方向的应变。 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 ，就可以计算该点主应力的方向和大小。应变花（见图3-8c）是由三个（或多个）互相之间按一定角度关系排列的应变片所组成的，用它测量某点三个方向的应变，然后按已知公式可求出主应力的方向和大小。图8-2列举了几种常用的应变花构造原理图，其主应力计算公式都有现成公式可查。现在市场上已有多种图案复杂的应变花供应。

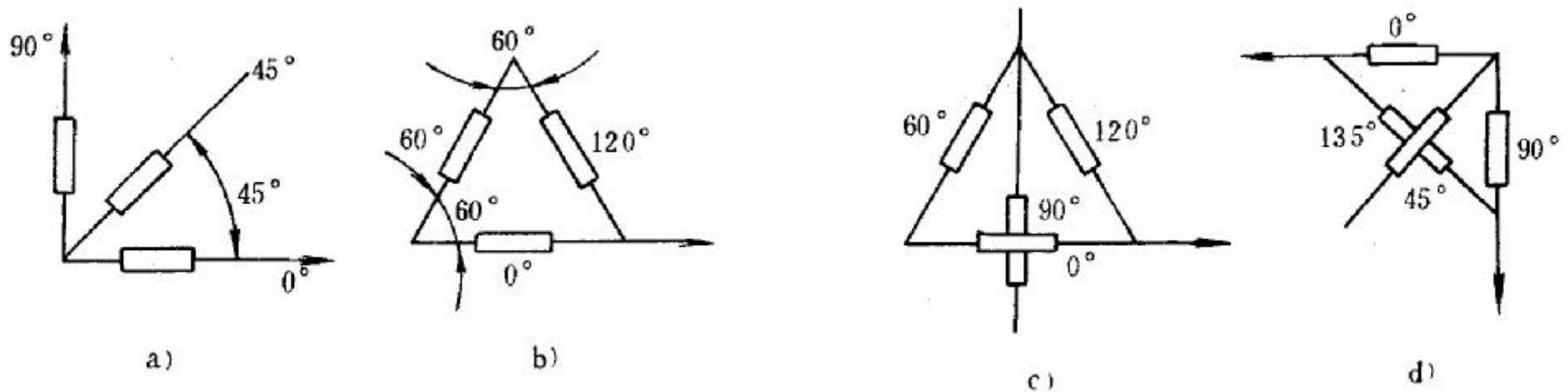


图 8-2 常用的应变花

第一节 应变、应力的测量

四、提高应变测量精确度的措施

在使用电阻应变片测量应变时，应尽可能消除各种误差，以提高测试精确度。一般可采用下列措施：

- 1) 选择合适的仪器并进行准确的定度。
- 2) 消除导线电阻引起的影响。
- 3) 减小读数漂移。
- 4) 补偿温度影响。
- 5) 减少贴片误差测量单向应变时，应变片的轴线与主应变方向有偏差时，也会产生测量误差。
- 6) 力求应变片实际工作条件和额定条件的一致
- 7) 排除测量现场的电磁干扰

第一节 应变、应力的测量

五、测点的选择

测点的选择和布置对能否正确了解结构的受力情况和实现正确的测量影响很大。测点愈多，愈能了解结构的应力分布状况，然而却增加了测试和数据处理的工作量和贴片误差。因此，根据应以最少的测点达到足够真实地反映结构受力状态的原则，来选择测点。为此，一般应考虑：

- 1) 预先对结构进行大致的受力分析，一预测其变形形式，找出危险断面及危险位置。这些地方一般是处在应力最大或变形最大的部位，而最大应力一般又是在弯矩、剪力或扭矩最大的截面上。然后。根据受力分析和测试要求，结合实践经验最后选定测点。
- 2) 在截面尺寸急剧变化的部位或因孔、槽导致应力集中的部位，应适当多布置一些测点，以便了解这些区域的应力梯度情况。
- 3) 如果最大应力点的位置难以确定，或者为了了解截面应力分布规律和曲线轮廓段应力过渡的情况，可在截面上或过渡段上比较均匀地布置5~7个测点。
- 4) 利用结构与载荷的对称性，以及对结构边界条件的有关知识来布置测点，往往可以减少测点数目，减轻工作量。
- 5) 可以在不受力或已知应变、应力的位置上安排一个测点，一以便在测试时进行监视和比较，有利于检查测试结果的正确性。

第二节 力的测量

在国际单位制中，力是一个导出量，由质量和加速度的乘积来定义。力的基准量取决于质量、时间和长度的基准量。质量的基准量是一个保存在法国塞夫勒（Sevres）市国际计量局内的钢铱圆柱体，称为国际千克基准。其他基准通过精密度为 10^9 分之几的天平来和该基准比对。

一、常用的测力方法

常用的测力方法大致有下列几种：

- 1) 用已知重力或电磁力去平衡被测力，从而直接测得被测力。
- 2) 通过测量一个在被测力作用下的已知质量的物体的加速度来间接测量被测力。
- 3) 通过测量由被测力产生的流体压力来测得被测力。
- 4) 当被测力张紧一振动弦，该弦的固有频率将随被测力的大小而改变。通过测量该频率的变化来测得被测力。
- 5) 通过测量在被测力作用下某弹性元件的变形或应变来测得被测力。

上述的测力方法，大部分用于静态力或缓慢变化力的测量。但最后一种方法则适用于静态力或频率数千赫以下的动态力的测量，因而是一种应用极广泛的测力方法。本章也只介绍与之有关的问题。

第二节 力的测量

二、弹性变形式的力传感器

这类传感器的测量基础是弹性元件的弹性变形和作用力成正比的现象。

(一) 电阻应变片式力传感器

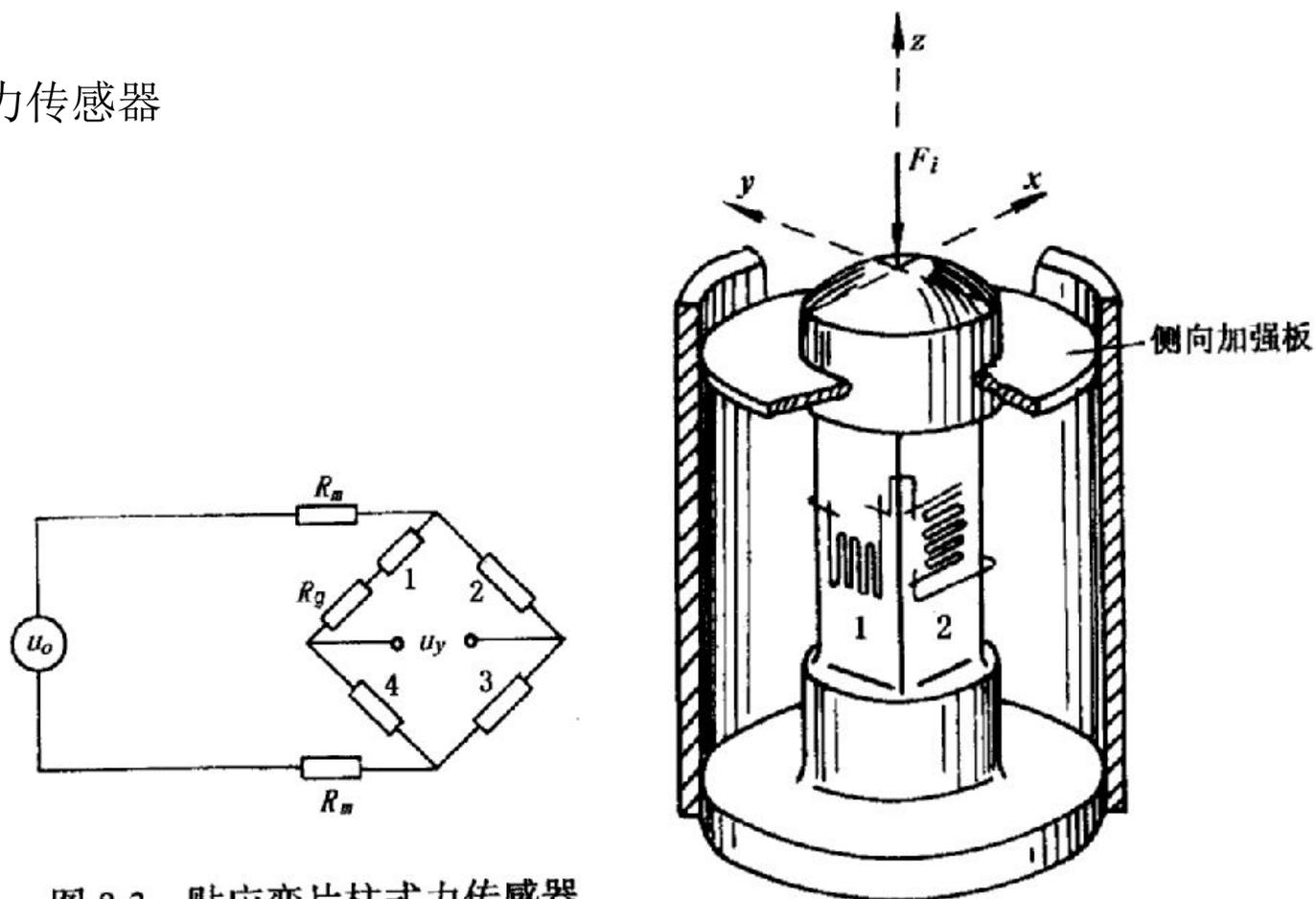


图 8-3 贴应变片柱式力传感器

第二节 力的测量

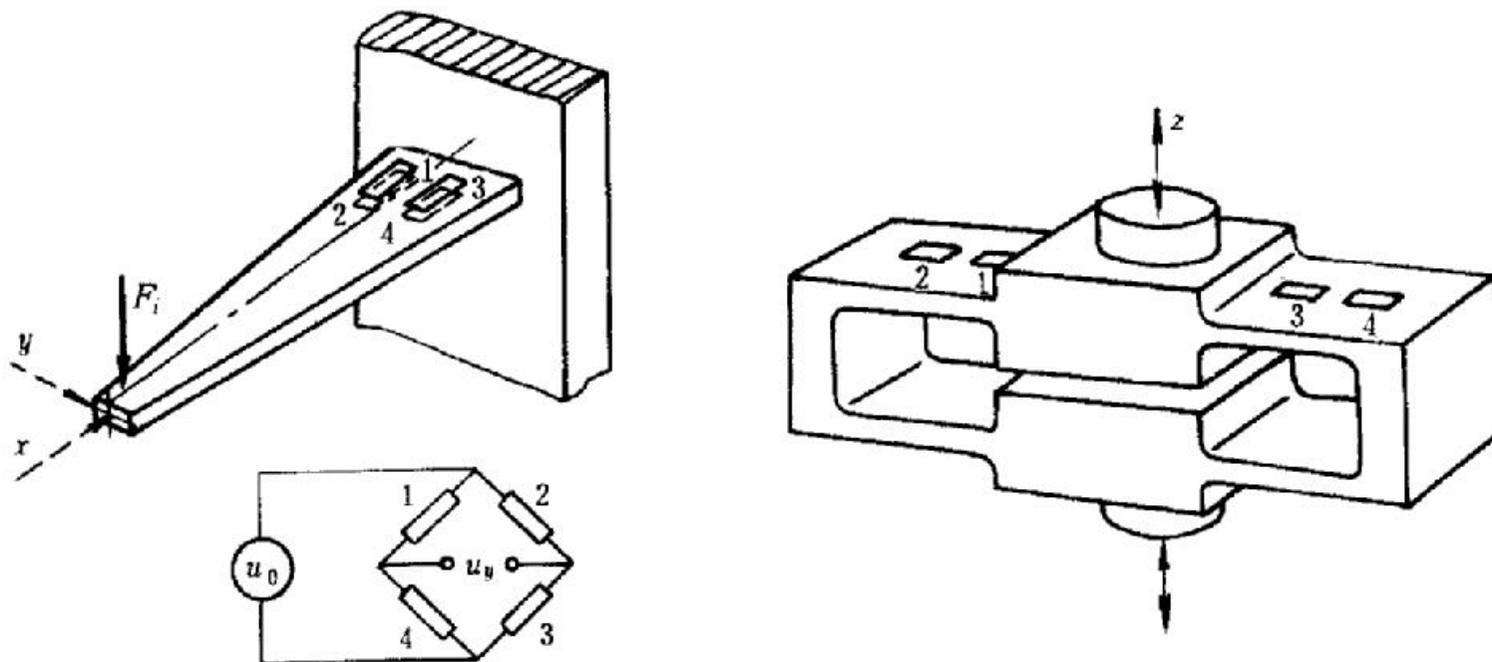


图 8-4 贴应变片梁式力传感器

注：应变片 2 和 4 在梁的下面

第二节 力的测量

(二) 差动变压器式力传感器

图8-5是一种差动变压器式的力传感器。弹性元件的变形由差动变压器转换成电信号。其工作温度范围比较宽（ $-54\sim 93^{\circ}\text{C}$ ），在长、径比较小时，受横向偏心力的影响较小。

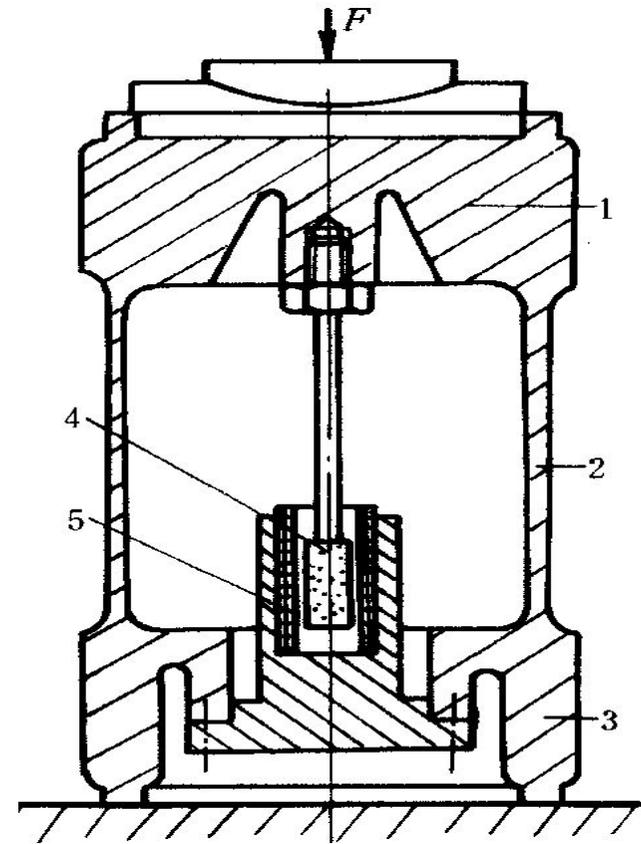


图 8-5 差动变压器式力传感器

1—上部 2—变形部 3—下部
4—铁心 5—差动变压器线圈

第二节 力的测量

(三) 压电式力传感器

在第七章中曾经介绍过压电式阻抗头，它便是由压电式加速度计和压电式力传感器组合而成的。图8-6是两种压电式力传感器的构造图。左边的力传感器的内部加有恒定预压载荷，使之在1000N的拉伸力到5000N的压缩力范围内工作，不致出现内部元件的松弛。右侧的力传感器，带有一个外部预紧螺母，可用来调整预紧力，以保证力传感器在4000N拉伸力到16000N压缩力的范围中正常工作。

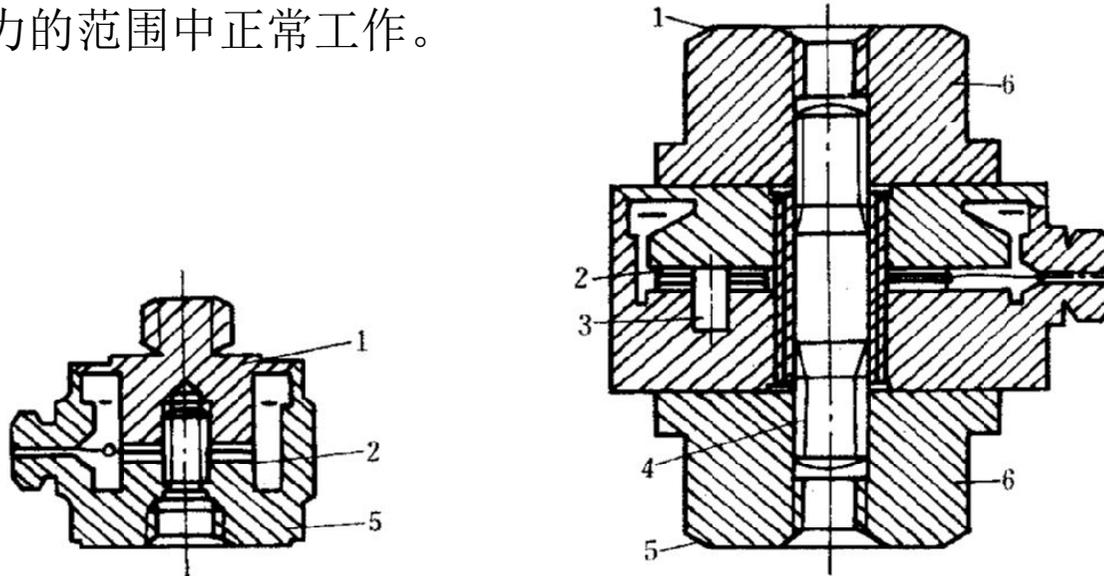


图 8-6 压电式力传感器

1—承力头 2—压电晶体片 3—导销 4—预
紧螺栓 5—基座 6—预紧螺母

第二节 力的测量

(四) 压磁式力传感器

某些铁磁材料（如正磁致伸缩材料）受压缩时，其导磁率沿应力方向下降，而沿着与应力垂直的方向则增加。材料受拉时，导磁率变化正好相反。

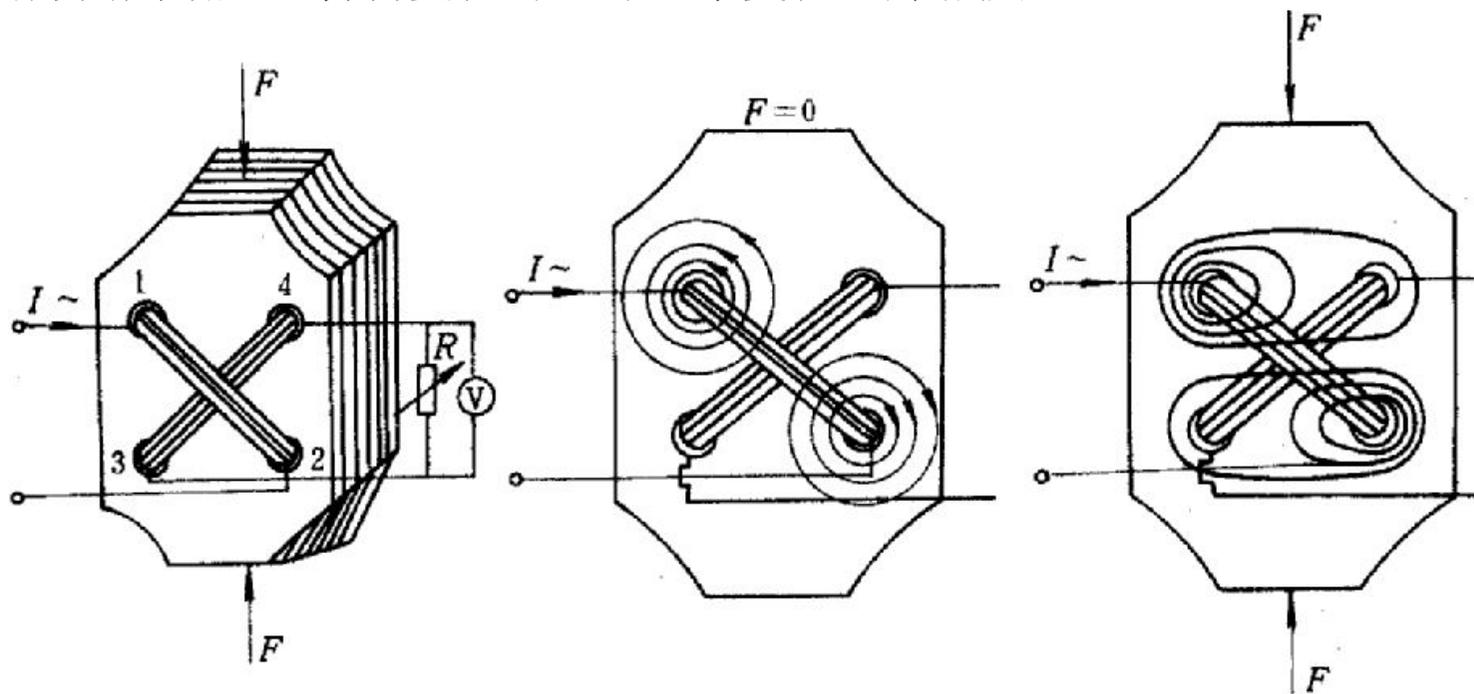


图 8-7 压磁式力传感器工作原理

第二节 力的测量

三、空间力系测量装置

一般空间力系包括三个互相垂直的分力和三个互相垂直的力矩分量。对未知作用方向的作用力，如需完全测定它，也需按空间力系来处理。

在空间力系测量工作中，巧妙地设计受力的弹性元件和布置应变片或选择压电晶体片的敏感方向是成功的关键。

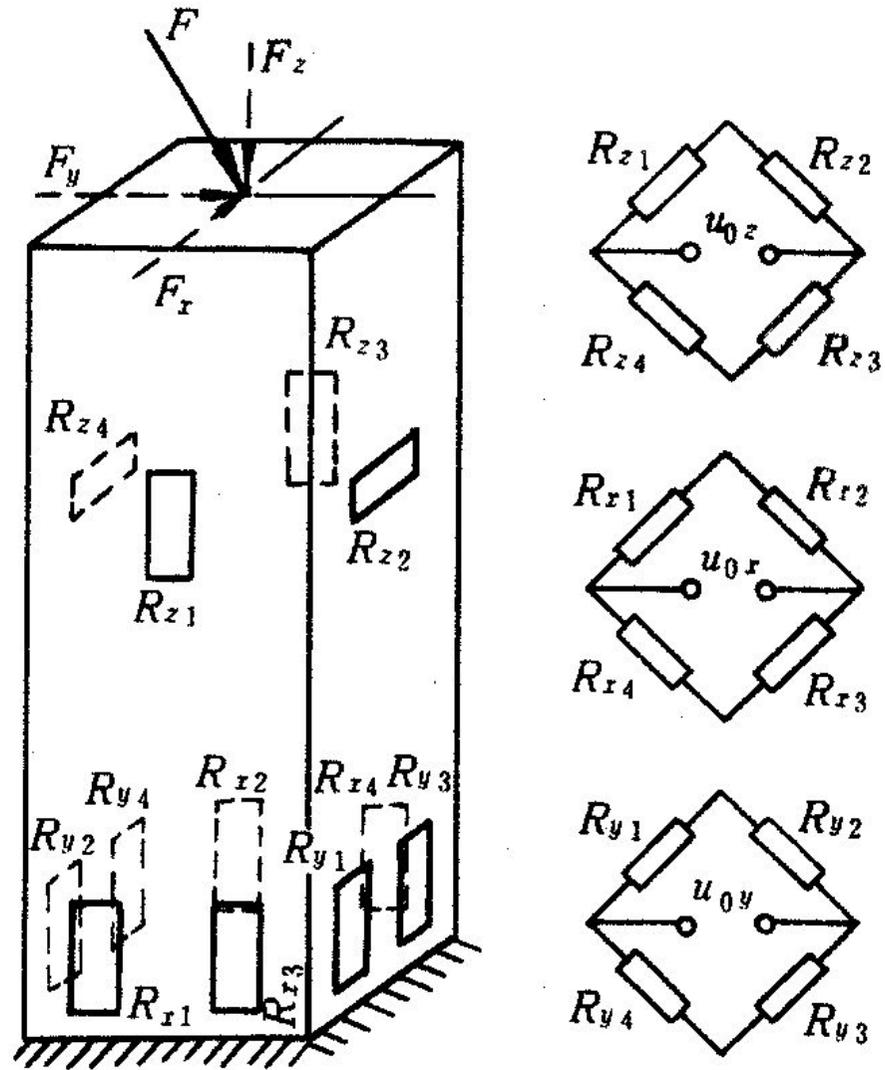
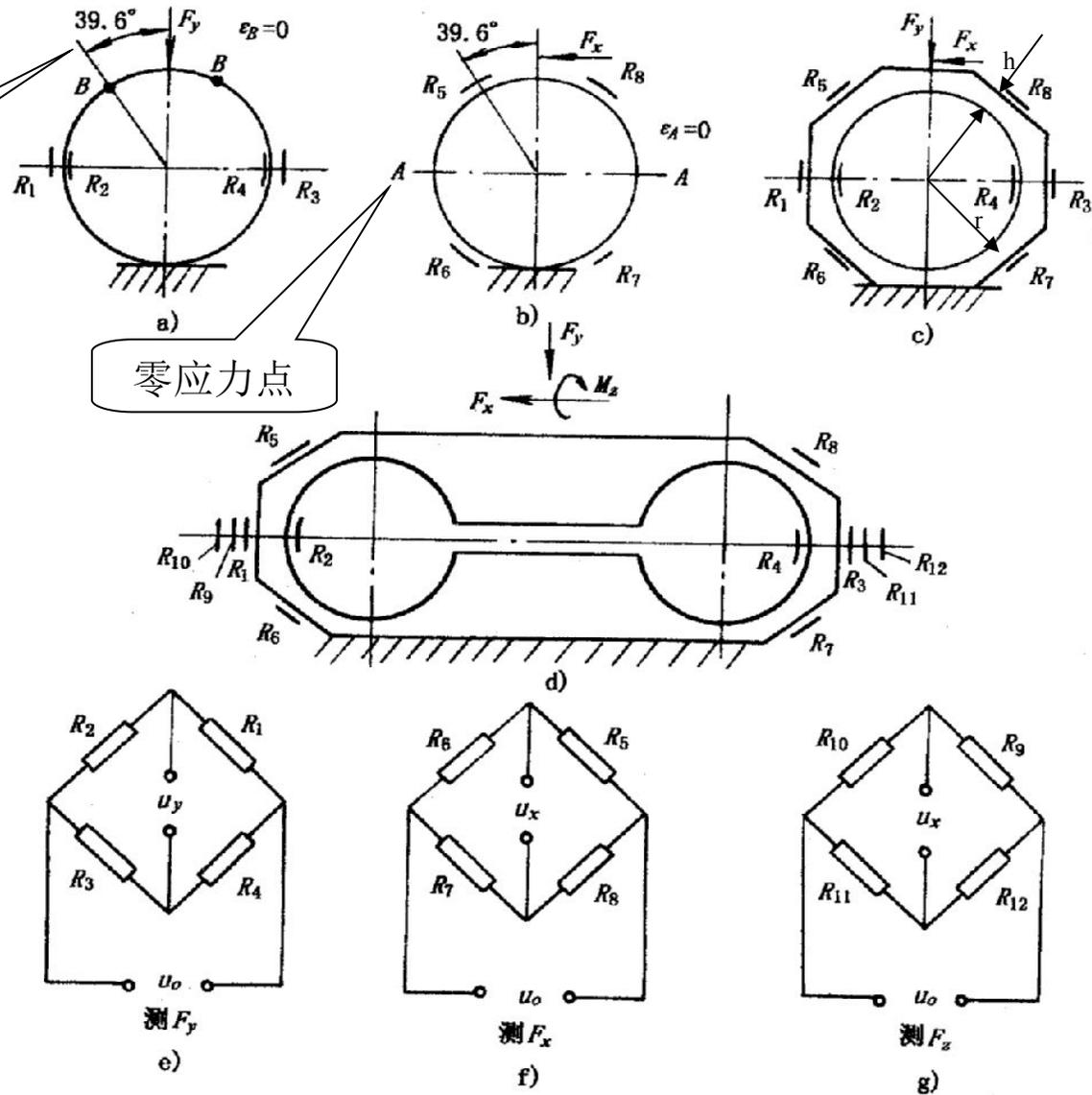


图 8-8 测量未知力的三分量

第二节 力的测量

零应力点



当八角环的 h/r 较小时 (h —环的厚度, r —环的平均半径), 零应变点在 39.6° 附近。随 h/r 比值的增大此角度也增大; 当 $h/r=0.4$ 时, 零应变点在 45° 处, 故一般八角环的一部分应变片贴在 45° 处

图 8-9 圆环和八角环

第二节 力的测量

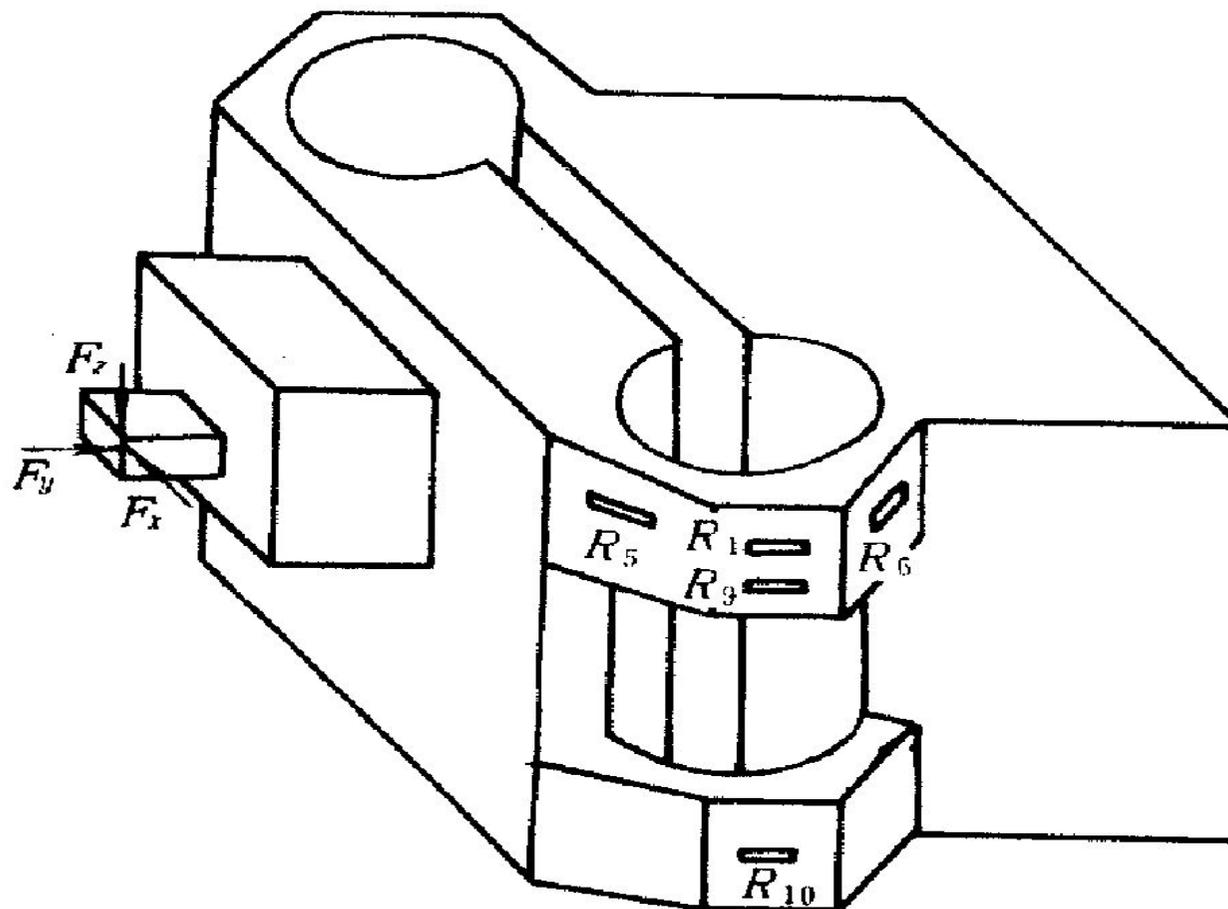


图 8-10 八角环式车床切削测力计

第二节 力的测量

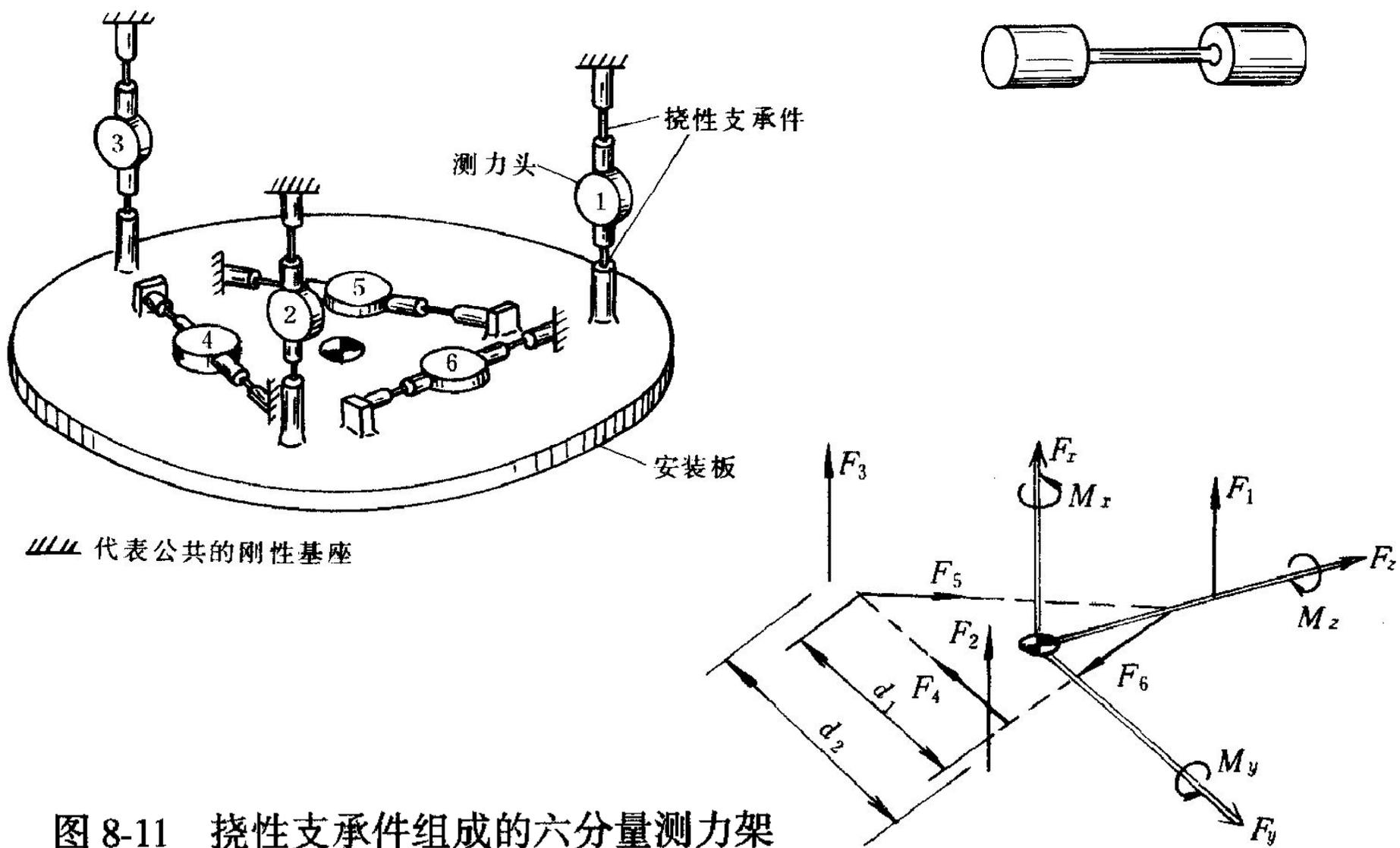


图 8-11 挠性支承件组成的六分量测力架

第二节 力的测量

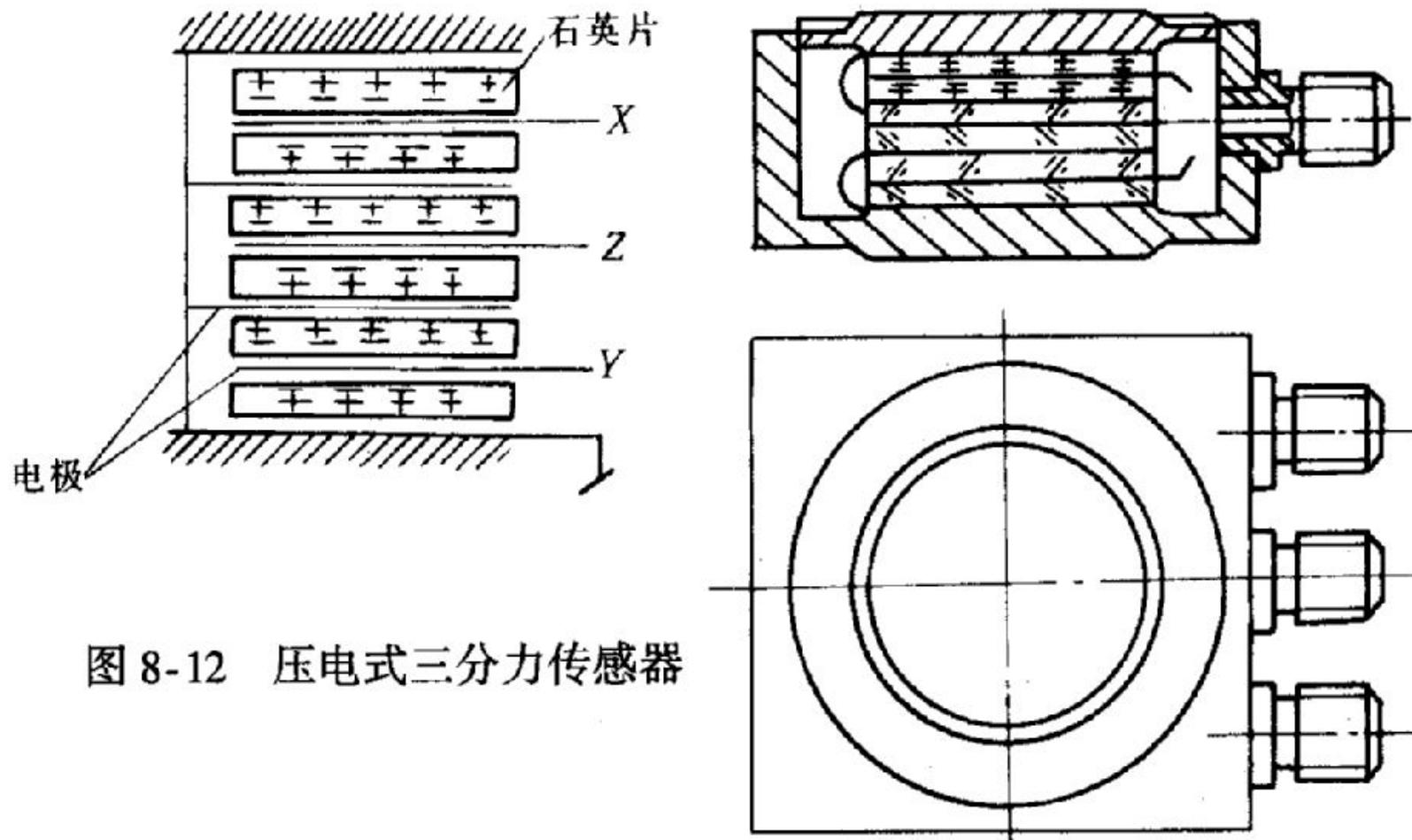


图 8-12 压电式三分力传感器

第二节 力的测量

四、动态测力装置的使用特点

动态测力装置除了在灵敏度、线性误差、频率范围等方面应满足预定要求外，使用时还应考虑动力学方面的一些特点。

(一) 动态测力装置的动态误差

在一般情况下，由于上述三方面的原因，测力弹性元件的弹性力（或弹性变形）和被测力总有幅值和相位的差异。因此在实际使用条件下，在整个工作频率范围内进行全面的定度和校准是一件必不可少的工作。此外，从图8-13中可以看到，如果能测出阻尼

力 F_c 和惯性力 F_m ，将它们与 F_k 相加，就可以得出实际作用力 F 来，从而消除了测量的方法误差。由于 F_k 、 F_c 和 F_m 分别和测力装置的位移、速度和加速度成正比，但方向相反，若用一个质量甚小的加速度计来测量测力装置的加速度，用微分电路由弹性位移信号求得速度信号，然后用运算放大器将这两项信号按适当比例加进位移信号中，对 F_k 进行补偿，便可得到实际作用力 F ，消除了测量方法误差。

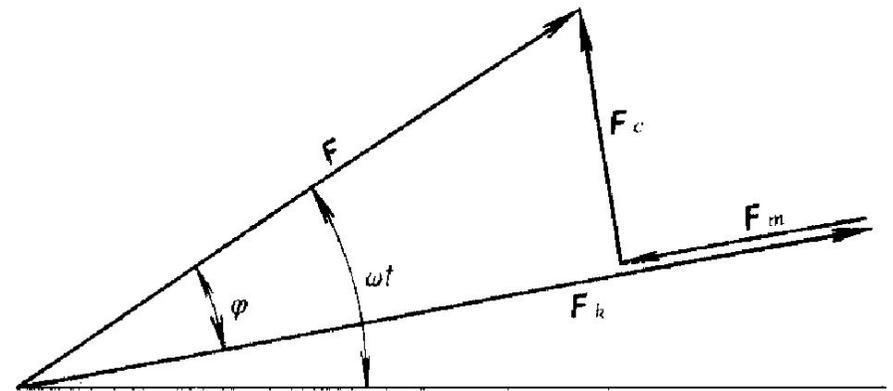


图 8-13 实际作用力和测力装置的惯性力、阻尼力以及弹性力的关系

第二节 力的测量

(二) 注意减小交叉干扰

一个理想的多向测力装置，要求在互相垂直的三个方向中的任何一个方向受到力的作用时，其余两方向上不应有输出。实际上却常常会有微小输出，这种现象称为交叉干扰。为了减小交叉干扰，必须采取相应的措施，例如，精心设计弹性元件，使其受力变形合理；正确选择应变片的粘贴部位并准确地粘贴之；等等。最后，还往往利用测力装置定度结果来修正交叉干扰的影响。

(三) 测力装置的定度和频率特性的测定

被测力的大小实际上是与预先定度的结果作比较而确定的，定度是否精确，决定着测量结果的精确度。静态定度最主要的目的是确定定度曲线、灵敏度和各向交叉干扰度。为此，定度时所施加的标准力的量值和方向都必须精确。加载方向对确定交叉干扰度有着重大影响。力的作用方向一旦偏离指定方向，就会使交叉干扰度产生变化。通常采用螺旋机构或杠杆机构来施加标准力，而标准力的量值则用砝码或标准测力环来度量。确定整个测力装置频率特性的具体方法与一般确定某一系统，特别是机械系统的频率响应特性的方法没有原则差别。但是必须特别强调的是动态特性测定必须在实际工作条件下进行。常用的激励是正弦激励和冲击激励。对于后者，在测得激励力 $x(t)$ 和测力装置的响应 $y(t)$ 之后，一般采用式(5-55)来确定其频率响应函数 $H(f)$ 。综上所述，在设计和使用时，必须注意减小交叉干扰，必须充分估计测力装置、被测机械系统以及支承系统各元件的刚度、质量和阻尼特性对测力装置输出的影响。减小这些影响的有效方法是：按照实际使用条件进行现场定度；尽量避免专为测试而增减被测机械系统的构件；力求使测力装置简单化、整体化；采用适当的补偿技术等。

第二节 扭矩的测量

一、通过转轴应变或应力来测量扭矩

在这种测量方法中，最常采用的是应变式扭矩传感器、在转轴的适当部位按图8-14粘贴四片应变片，作全桥连接，便成为扭矩传感器。若能保证应变片粘贴位置准确、应变片特性匹配，则这种装置具有良好的温度补偿和消除弯曲应力、轴向应力影响的功能。粘贴后的应变片必须准确地与轴线成 45° ，应变片1和3、2和4应在同一直径的两端。采用应变花可以简化粘贴并易于获得准确的位置。为了把随轴旋转的应变片产生的信号送到固定的应变仪，或采用集流环（见图3-11），通过此旋转元件和静止元件（电刷）的接触，将信号传输出来；或采用发射器件和接收器件之间电磁场的耦合方式，无接触地将信号耦合到接收端。由于应变片电阻的变化率本来就很小，因此要求集流环和电刷的接触电阻变化应很小，以免造成测量误差。

显然这样测得的是在扭矩作用下转轴表面的主应变 ε 。从材料力学得知，主应变和所受到的扭矩成正比关系。

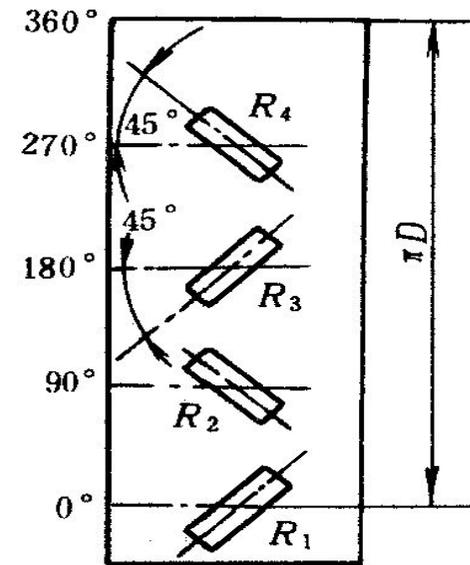


图 8-14 应变片式
扭矩测量法

第二节 扭矩的测量

压磁式扭矩传感器（图8-15）是利用铁磁材料制成的转轴，在受扭矩作用后，应力变化导致磁阻变化的现象来测量扭矩的。两个绕有线圈的Π型铁心A和B，其中A-A沿轴线、B-B沿垂直于轴线方向放置，两者相互垂直。其开口端和被测轴表面保持1~2mm的空隙。当A-A线圈通过交流电流，形成通过转轴的交变磁场。在转轴不受扭矩时，磁力线和B-B线圈不交链。当转轴受扭矩作用后，转轴材料磁阻沿正应力方向减小，沿负应力方向增大，从而改变了磁力线分布状况，使部分磁力线与B-B线圈交链，并在其中产生感应电势。感应电势 u_y 将随扭矩增大而增大，并在一定范围内两者成线性关系。此种传感器是一种非接触测量方式，使用方便。

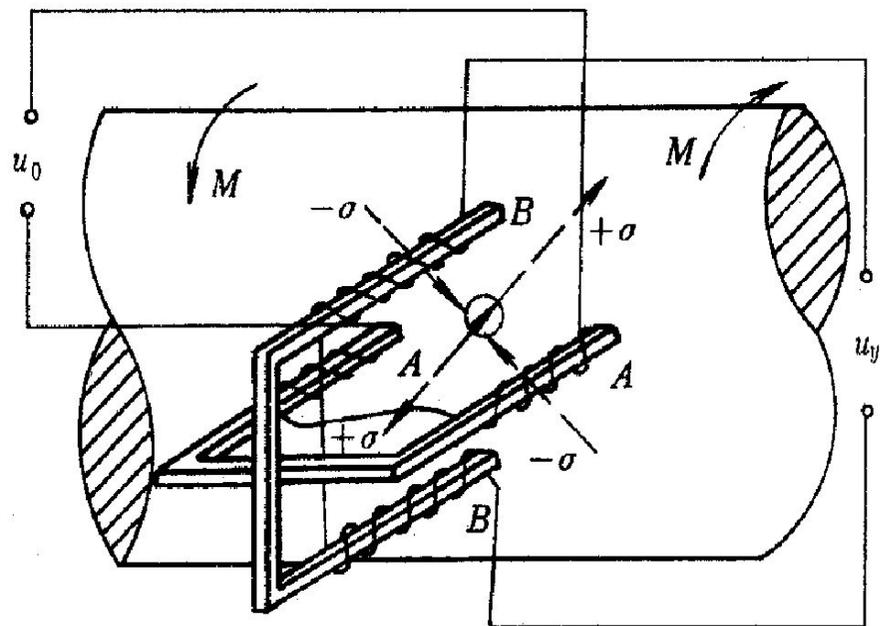


图 8-15 压磁式扭矩传感器

第二节 扭矩的测量

二、利用转轴的扭转变形来测量扭矩

转轴受扭矩作用后，产生扭转变形，两横截面的相对扭转角与扭矩成正比。利用光电式、感应式等传感器可以测得相对扭转角，从而测得扭矩。

感应式扭矩传感器（图8-16）是在转轴上固定两个齿轮2，它们的材质、尺寸、齿形和齿数均相同。由永久磁铁和线圈组成的磁电式检测头3和4对着齿顶安装。在转轴不承受扭矩时、两线圈输出信号有一初始相位差。承载后，该相位差将随两齿轮所在横截面之间的相对扭转角的增加而加大，其大小与相对扭转角、扭矩成正比。

光电式扭矩传感器（图8-17）是在转轴上固定两圆盘光栅。在未承受扭矩时，两光栅的明暗区正好互相遮挡，没有光线透过光栅照射到光敏元件，也无输出。当转轴受扭矩后，扭转变形将使两光栅相对转过一角度，使部分光线透过光栅照射到光敏元件上而产生输出、扭矩愈大，扭转角愈大，穿过光栅的光量愈大，输出愈大，从而可测得扭矩。

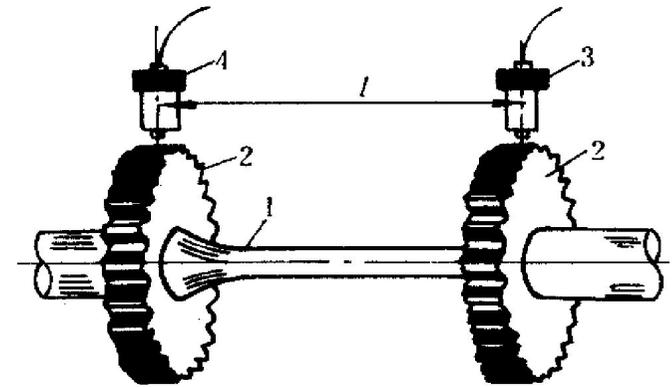


图 8-16 感应式扭矩传感器

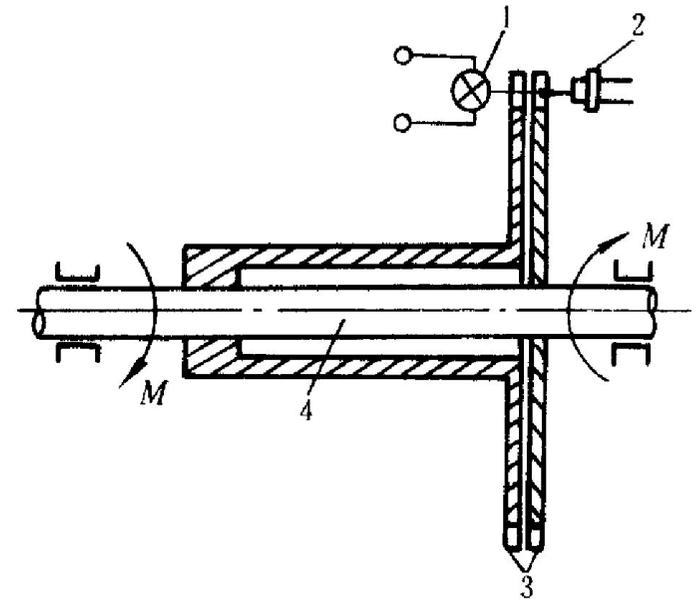


图 8-17 光电式扭矩传感器

1—光源 2—光敏元件 3—光栅 4—转轴

本章重点