

第 2 章 振动测试传感器

所谓振动，就是物体或某种状态随时间往复变化的现象。这类现象有的是其本身固有原因引起的，有的是外界干扰引起的。在工程界，太空中的宇宙飞船、天空中的飞机、地面上的汽车和火车、海洋里的舰船等，普遍存在着机械振动。在生物界，心脏的跳动、肺的呼吸等，在某种意义上来说，都是振动。振动是自然界最普遍的现象之一。可以这样说：人类生活在振动的世界里。

2.1 振动的描述

常用的描述振动的物理量有：位移、速度、加速度、力和应变。其中，位移、速度、加速度是最常用的描述振动响应的物理量。

(1) 位移。位移是表征物体上一点相对于某参考系的位置变化的时间变量，用符号 x 表示。国际标准单位：m。计算公式：

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (2-1)$$

式中， Δx 代表 Δt 时间间隔内质点位置的变化， x_1 表示 t 时刻质点位矢， x_2 代表 $t + \Delta t$ 时刻质点位矢。位移的量纲是 L 。 L 是国际单位制 (SI) 中基本量长度的量纲。

(2) 速度。速度是位移随时间的变化率，用符号 v 表示。国际标准单位：m/s。计算公式：

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (2-2)$$

就是位移对时间求导。速度的量纲是 LT^{-1} 。 T 是国际单位制 (SI) 中基本量时间的量纲。

(3) 加速度。加速度是速度随时间的变化率，用符号 a 表示。国际标准单位：m/s²。计算公式：

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (2-3)$$

就是速度对时间求导。加速度的量纲是 LT^{-2} 。

(4) 力。力是物体相互间的机械作用，其作用结果使受力物体的形状和运动状态发生改变，用符号 F 表示。国际标准单位：N。计算公式：

$$F = ma \quad (2-4)$$

就是加速度与质量的乘积。力的量纲是 MLT^{-2} 。 M 是国际单位制 (SI) 中基本量质量的量纲。

(5) 应变。应变又分为线应变和角应变。

① 线应变：表示单位长度线段的伸长或缩短，用符号 ε 表示。

② 角应变：平面内两条正交的线段变形后其直角的改变量。

表 2-1 列举了描述振动响应的物理量的名称、量纲、符号、单位及计算公式，以做对比。

表 2-1 描述振动响应的物理量

物理量	量纲	符号	单位	计算公式
位移	L	x	m	$\Delta x = x_2 - x_1$
速度	LT^{-1}	v	m/s	$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$
加速度	LT^{-2}	a	m/s^2	$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$

2.2 质点振动系统

质点振动系统是指，假设构成振动系统的物体如质量块、弹簧等，不论其几何大小如何，都可以视为一个物理性质集中的系统，对于这种系统，质量块上各点的振动状态是均匀的。这种振动系统也称之为集中参数系统。虽然这是一种理想化的振动系统，然而在一定的条件下，实际系统可以近似为这种系统，而且在上述的假设下，可大大简化数学处理，而研究所得的振动规律对于分析实际工程振动问题具有重要的指导意义，因此对质点振动系统的研究显得十分重要^[1]。

2.2.1 无阻尼系统的自由振动

最简单的无阻尼系统的自由振动是单自由度振动系统。设质量为 m 的物块通过刚度为 k 的弹簧连接到基础上，沿铅垂方向自由振动。物块的位置完全由其在铅垂方向上的坐标 x 决定，这就构成了典型的单自由度系统，称为弹簧-质量系统，如图 2-1 所示。

取物块的静平衡位置为坐标原点 O ， x 轴沿弹簧变形方向竖直向下为正。当物块在静平衡位置时，由平衡条件 $\sum F = 0$ 得到：

$$mg = kl_{st} \quad (2-5)$$

式中， l_{st} 称为弹簧的静变形。

当物块偏离平衡位置 x ，由牛顿第二定律可得物块的运动微分方程为：

$$m\ddot{x} = -kx \quad (2-6)$$

令

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-7)$$

则式 (2-6) 可写为：

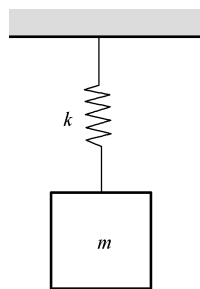


图 2-1 弹簧-质量系统

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2-8)$$

此微分方程的一般解为:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (2-9)$$

固有频率为:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-10)$$

在不受其他外力作用的情况下, 由于没有阻尼作用, 此系统一旦开始振动, 将以其固有频率永远不停地振动下去。

2.2.2 有阻尼系统的衰减振动

对实际振动系统(如调谐音叉等)的观察告诉我们, 由于摩擦或阻力的影响, 振动并不会无限期地延续下去, 随着时间的推移, 振动系统的振幅将逐渐衰减, 最后趋于零而停止振动, 这说明, 在振动过程中, 物块除受恢复力的作用外, 还受到阻力的作用。振动系统中的阻力统称为阻尼。我们称这样的振动系统为有阻尼振动系统。

图 2-2 所示为典型的有阻尼振动系统, 其运动不仅取决于弹簧的刚度系数 k , 而且取决于阻尼器的阻尼系数 c 。当物块振动时, 阻尼器将产生与速度成正比的阻尼力 $-c\dot{x}$, 它与质量块的速度成正比, 方向与速度相反。

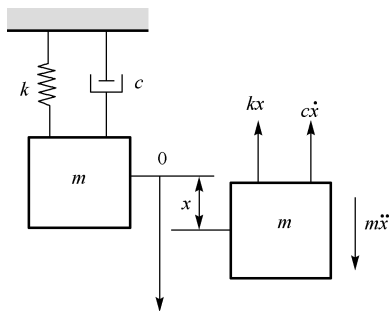


图 2-2 有阻尼振动系统

有阻尼单自由度系统的振动方程为:

$$m\ddot{x} = -c\dot{x} - kx \quad (2-11)$$

它是一个二阶常系数线性齐次微分方程, 其特征方程为:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_0\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (2-12)$$

式中, $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{\delta}{\omega_0}$, $\delta = \frac{c}{m}$ 称为衰减系数。

特征方程的根为:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2-13)$$

由此可见, 随着 ζ 值的不同, λ_1 与 λ_2 也具有不同的值, 因而运动规律也就不同。下面

按 $\zeta < 1$ 、 $\zeta > 1$ 、 $\zeta = 1$ 这三种情况进行讨论。

(1) $\zeta < 1$ ，即欠阻尼的情况，这时特征方程的一对共轭复根为：

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\zeta\omega_0 + i\omega_d \\ \lambda_2 = -\zeta\omega_0 - i\omega_d \end{cases} \quad (2-14)$$

振动方程的解为：

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} (C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t) \quad (2-15)$$

式中， C_1 、 C_2 为积分常数，由初始条件决定。

此时系统的固有频率为：

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2-16)$$

比较式 (2-9) 和式 (2-15) 我们可以发现，衰减振动比无阻尼自由振动多了一项衰减项 $e^{-\zeta\omega_0 t}$ ，这种情况下位移振幅不再是常数，而是随时间做指数衰减。衰减系数越大，振幅衰减得也越快。物块的衰减振动规律如图 2-3 所示。

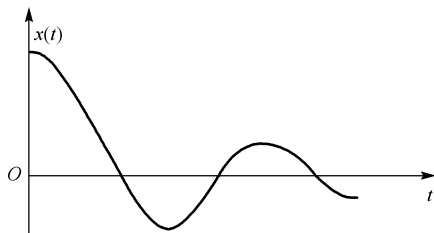


图 2-3 欠阻尼振动衰减曲线

(2) $\zeta > 1$ ，即过阻尼的情况，这时特征方程有两个不等的实根：

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\zeta\omega_0 + \omega^* \\ \lambda_2 = -\zeta\omega_0 - \omega^* \end{cases} \quad (2-17)$$

式中， $\omega^* = \omega_0 \sqrt{\zeta^2 - 1}$ 。

振动方程 (2-17) 的通解为：

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} (C_1 \text{ch} \omega^* t + C_2 \text{sh} \omega^* t) \quad (2-18)$$

式中， C_1 、 C_2 为积分常数，由初始条件决定。

此时物块的运动为一种按指数规律衰减的非周期蠕动，没有振动发生，其运动衰减规律如图 2-4 所示。

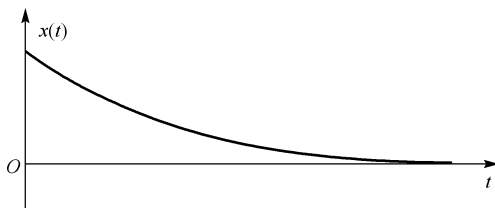


图 2-4 过阻尼振动衰减曲线

(3) $\zeta=1$ ，即临界阻尼的情况，这时特征方程有两个相等的实根：

$$\lambda_{1,2} = -\omega_0 \quad (2-19)$$

因此，振动方程的通解为：

$$x(t) = e^{-\omega_0 t} (C_1 + C_2 t) \quad (2-20)$$

式中， C_1 、 C_2 为积分常数，由初始条件决定。这种情况与过阻尼的情况相似，运动已无振动的性质。但它是过阻尼情况的下边界，在受相同激励的条件下，临界阻尼情况中的位移更大，且衰减更快，返回平衡位置的时间更短，其运动衰减规律如图 2-5 所示。

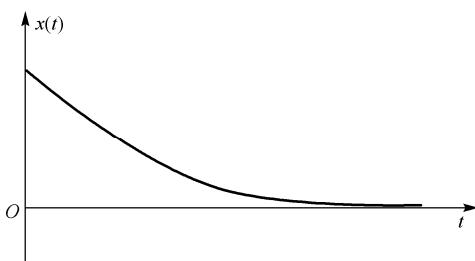


图 2-5 临界阻尼振动衰减曲线

2.2.3 质点的强迫振动

由于阻尼的作用，一个自由振动系统的振动不能维持很久，它会逐渐衰减直至停止。要使振动持续不停，就需要不断地从外界获得能量，这种受到外部持续作用而产生的振动称为强迫振动。

设一个外力作用在一个单自由度振动系统上，如图 2-6 所示。我们一般将外力称为强迫力，假定强迫力随时间做简谐变化，即

$$F(t) = F_A e^{j\omega t} \quad (2-21)$$

式中， F_A 为强迫力的幅值， $\omega = 2\pi f$ 为强迫力的圆频率， f 为强迫力的频率。将强迫力加到质点振动系统，得到系统振动方程为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_A e^{j\omega t} \quad (2-22)$$

强迫振动方程是二阶的非其次常微分方程，其一般解为该方程的一个特解与相应的齐次方程通解之和。我们已经获得了相应的自由振动方程的一般解，关键就是寻找一个特解，假设特解的形式为：

$$x = x_A e^{j\omega t} \quad (2-23)$$

式中， x_A 为待定常数。将式 (2-23) 代入振动方程 (2-22) 得到：

$$x_A (-m\omega^2 + j\omega c + k) = F_A \quad (2-24)$$

由此确定：

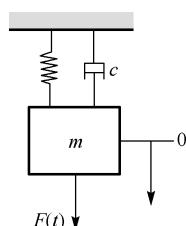


图 2-6 强迫振动系统

$$x_A = \frac{F_A}{-m\omega^2 + j\omega c + k} = H(\omega)F_A \quad (2-25)$$

式中, $H(\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + j\omega c}$ 称为导纳, 与频率有关。

获得非齐次方程的特解和对应的齐次方程的通解之后, 可以得到方程的一般解的形式为:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi) + x_A e^{j\omega t} \quad (2-26)$$

式中, 第一项为瞬态解, 它描述了系统的自由衰减振动, 仅在振动的开始阶段起作用, 当时间足够长以后, 它的影响逐渐减弱并最终消失。第二项为稳态解, 它描述了系统在强迫力的作用下进行强迫振动的状态, 因为它的振幅恒定, 因此称为稳态振动。从式(2-26)可以看到, 当外力施加到质点振动系统以后, 系统的振动状态比较复杂, 它是自由衰减振动和稳态振动的合成, 这种振动状态描述了强迫振动中稳态振动逐步建立的过程。当一定时间后, 瞬态振动消失, 系统达到稳态振动。

对于大多数振动与声学问题, 研究稳态振动状态更有意义, 下面就来简单分析一下稳态振动的规律。设时间足够长以后, 系统达到稳态, 其位移可以表示为:

$$x = x_A e^{j(\omega t - \theta)} \quad (2-27)$$

这是一种等幅简谐振动, 这里的振幅 x_A 是一个随时间变化的实数, θ 表示振动位移与外力之间的相位关系, 其振动频率就是外力的频率 f 。振幅 x_A 由外力幅值 F_A 、外力频率 f 及系统的固有参数 M 、 K 、 c 共同决定。

2.3 工程振动测试方法

在振动的工程测试中, 测试技术和方法是多种多样的, 按测试参量的转换类型来分, 可以分为三类。

1) 机械式测量方法

利用杠杆原理将工程振动的参量放大后直接记录测量振动量的方法。这种方法简单方便, 抗干扰能力强, 但频率范围和动态性范围窄, 适用于精度和频率要求较低的振动测试。

2) 光学式测量方法

利用光干涉原理和光学杠杆原理, 将振动参量转换为光学信号, 并进行放大后显示和记录。如激光测振技术就是一种典型的光学式测量方法。

3) 电测方法

将工程振动测试中的参量转换为电信号, 经电子路线放大后显示和记录。这是目前在振动测试领域应用最广泛的测量方法。

上述三种测量方法获得信号的物理性质虽然各不相同, 但是测量系统的组成基本相同, 包含拾振、信号放大和显示记录三个环节。

2.4 常用振动传感器

将感受到的机械振动物理量作为输入，按一定规律转换成测量所需物理量后作为输出的一种装置，称为振动传感器。一般来说，以机械接收原理区分，振动传感器可分为相对式、惯性式两种，但以机电变换或所测物理量区分，由于变换方法和物理量多种多样，其种类繁多，在实际工程中的应用范围也非常广泛。振动传感器按其功能可有以下几种分类方法，如表 2-2 所示。

表 2-2 振动传感器分类^[2]

按机械接收原理分	①相对式，②绝对式
按机电变换原理分	①电动式，②压电式，③电涡流式，④ 电感式，⑤电容式，⑥电阻式
按所测机械量分	①位移传感器，②速度传感器，③加速度传感器，④力传感器，⑤应变传感器，⑥扭转传感器，⑦扭矩传感器

以上三种分类方法都是以某一个方面进行区分的，而在许多情况下，往往是将多种分类方法综合使用，如电涡流式位移传感器、压电式加速度传感器等。本书主要介绍几种工程常用的振动传感器。

2.4.1 电动式传感器

电动式传感器利用电磁感应原理，将运动速度转换成线圈中的感应电势输出，因此又称为感应式传感器。这种传感器的工作不需要外加电源，而是直接吸取被测物体的机械能并转换成电信号输出，是一种典型的发电型传感器。电动式传感器按力学原理，又可分为惯性式电动传感器和相对式电动传感器，图 2-7 所示为惯性式电动传感器的结构。

电动式传感器主要用于测量物体的振动速度，配以积分电路或微分电路还可测量振动位移或加速度。它的优点是灵敏度高、性能稳定，可制成多种结构形式以适应不同的测量场合。此外，由于输出功率大，可简化配套的测量电缆。电动式传感器的优点还包括输出阻抗低，由此可降低对绝缘和输出电路的要求，并减小连接电缆的噪声干扰。电动式传感器的缺点是易磨损、工作温度不高、频响范围有限等。

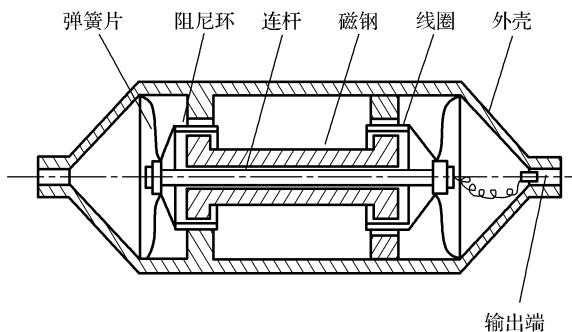


图 2-7 惯性式电动传感器结构示意图^[2]

2.4.2 电涡流式位移传感器

电涡流式位移传感器^[3]是一种非接触的线性化测振传感器。能静态和动态地测量被测金属导体距探头表面距离。电涡流式位移传感器的结构如图 2-8 所示。

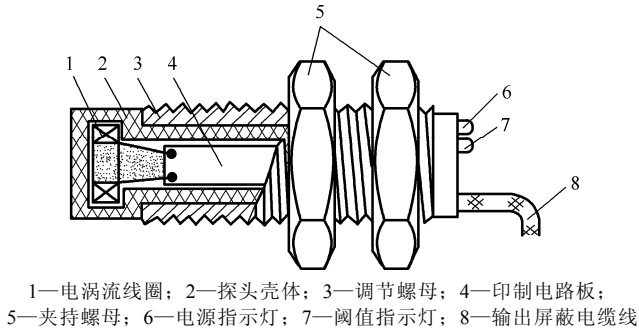


图 2-8 电涡流式位移传感器结构示意图

在高速旋转机械和往复式运动机械状态监测中，通过非接触的高精度振动、位移信号测试，能连续准确地采集到转子振动状态的多种参数，如轴的径向振动、振幅、轴向位置等。电涡流式位移传感器因其长期工作可靠性好、测量范围宽、灵敏度高、分辨率高等优点，在大型旋转机械状态的在线监测与故障诊断中得到广泛应用。

2.4.3 电感式传感器

电感式传感器的基本原理是电磁感应效应，即利用电磁感应将被测非电量（如压力、位移等）转换为电感量的变化输出，再通过测量转换电路，将电感量的变化转换为电压或者电流的变化，实现非电量到电量之间的转换。此类传感器主要有变气隙式电感传感器、差动螺线管式电感传感器、差动变压器式电感传感器及电涡流式电感传感器。

以变气隙式电感传感器为例，图 2-9 所示为其工作原理示意图。被测结构与衔铁相连，当衔铁移动时，铁芯与衔铁间的气隙厚度 δ 发生改变，引起磁路的磁阻变化，导致线圈电感值发生改变，通过感知电感量的变化，就能确定衔铁的位移量的大小和方向，即被测结构的振动位移大小和方向。电感式传感器具有结构简单、工作可靠、测量精度高、零点稳定、输出功率较大等一系列优点，其主要缺点是灵敏度、线性度和测量范围相互制约、传感器自身频率响应低等。

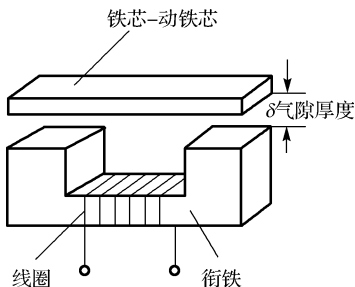


图 2-9 变气隙式电感传感器结构示意图

2.4.4 电容式传感器

电容式传感器是以电容器作为传感元件,将被测参量转换成电容量变化的一种转换装置。电容式传感器广泛用于位移、角度、振动、速度、压力、介质特性等方面的测量。典型的电容式传感器由上下电极、绝缘体和衬底构成。当薄膜受压力作用时,薄膜会发生一定的变形,上下电极之间的距离发生一定的变化,从而使电容发生变化。但电容式压力传感器的电容与上下电极之间的距离的关系是非线性关系,因此,要用具有补偿功能的测量电路对输出电容进行非线性补偿。图 2-10 所示为常用的电容式传感器的结构示意图。

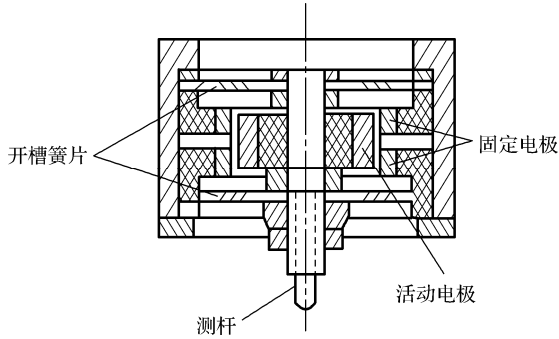


图 2-10 电容式传感器结构示意图^[2]

2.4.5 压电式加速度传感器

压电式加速度传感器又称压电加速度计,属于惯性式传感器。压电式加速度传感器基于正压电效应而工作,其原理是:某些晶体(如人工极化陶瓷、压电石英晶体等)在一定方向的外力作用下或承受变形时,其晶体面或极化面上将有电荷产生,这种从机械能(力、变形)到电能(电荷、电场)的变换称为正压电效应。

压电式加速度传感器最常见的类型有中心压缩式、剪切式等,结构如图 2-11 所示。当加速度传感器受振时,质量块加在压电元件上的力也随之变化。当被测振动频率远低于加速度传感器的固有频率时,则力的变化与被测加速度成正比。一般认为剪切式,特别是三角剪切式具有较高的稳定性,温度影响较小,线性度好,有较大的动态范围,因而得到广泛应用。

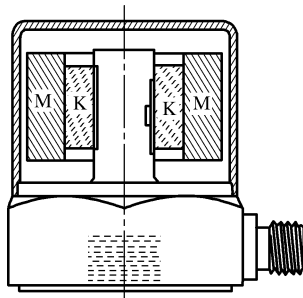
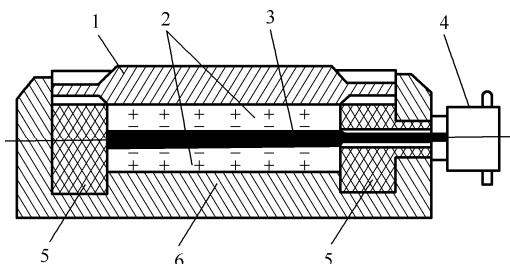


图 2-11 剪切式压电式加速度传感器结构示意图

2.4.6 压电式力传感器

在振动试验中，除了对振动响应的测试外，有时还需测量激励设备对结构激振力的大小。压电式力传感器的工作原理是晶体材料的压电效应。压电式力传感器具有刚度大、测量范围宽、线性及稳定性高、动态特性好等优点。按测力状态分，有单项、双向和三向传感器，它们在结构上基本一样。

图 2-12 所示为压电式单向测力传感器结构示意图，被测力通过传力上盖使压电晶体受压产生电荷，在两块晶片之间是一个片形电极，用于收集压电晶体产生的电荷。片形电极通过电极引出插头将电荷输出，通过测量输出电荷量就可获得作用于力传感器上的压力大小。



1—传力上盖；2—压电片；3—电极；4—电极引出插头；5—绝缘材料；6—底座

图 2-12 压电式力传感器结构示意图

2.4.7 阻抗头

阻抗头是一种综合性传感器。它集压电式力传感器和压电式加速度传感器于一体，其作用是在力传递点测量激振力的同时测量该点的运动响应。阻抗头由两部分组成，一部分是力传感器，另一部分是加速度传感器，结构如图 2-13 所示。它的优点是：保证测量点的响应就是激振点的响应。使用时将小头（测力端）与激振器的施力杆相连，大头（测量加速度）与被测结构连接。从力信号输出端测量激振力的信号，从加速度信号输出端测量加速度的响应信号^[2]。

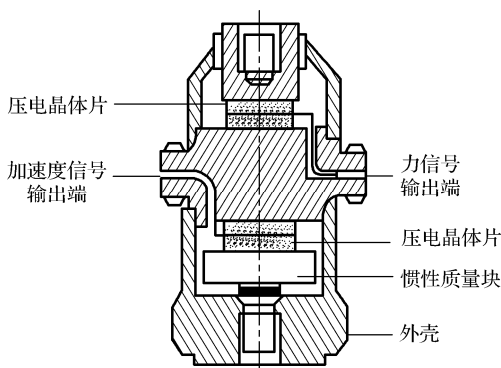


图 2-13 阻抗头结构示意图

2.4.8 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是以电阻应变计为转换元件的电阻式传感器。电阻应变式传感器实际上是惯性式传感器，如图 2-14 所示，它的质量块由弹性梁悬挂在外壳上，当质量块相对于仪器外壳发生相对运动时，弹性梁就发生变形，贴在弹性梁上的应变片的电阻值由于变形而产生变化。通过电阻动态应变仪测得电阻值的变化量及变化规律，经过计算，可求出有关的振动参量。

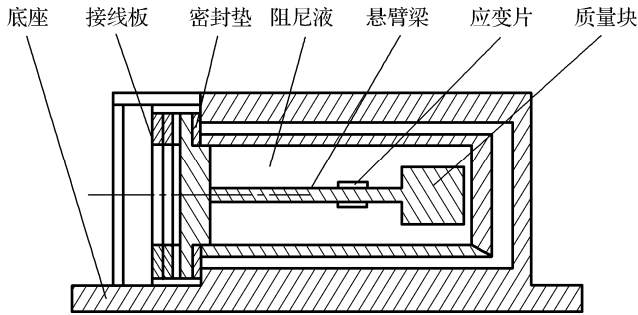


图 2-14 电阻应变式传感器结构示意图

工程中常用的电阻应变式传感器有应变式测力传感器、应变式压力传感器、应变式扭矩传感器、应变式位移传感器、应变式加速度传感器等。电阻应变式传感器的优点是精度高，测量范围广、寿命长，结构简单，频响特性好，能在恶劣条件下工作，易于实现小型化、整体化和品种多样化等。它的缺点是对于大应变有较大的非线性、输出信号较弱，但可采取一定的补偿措施。因此它广泛应用于自动测试和控制技术中。

2.4.9 激光测振仪

激光测振技术是基于光学的多普勒效应发展而来的一种测振技术，其工作原理如图 2-15 所示。

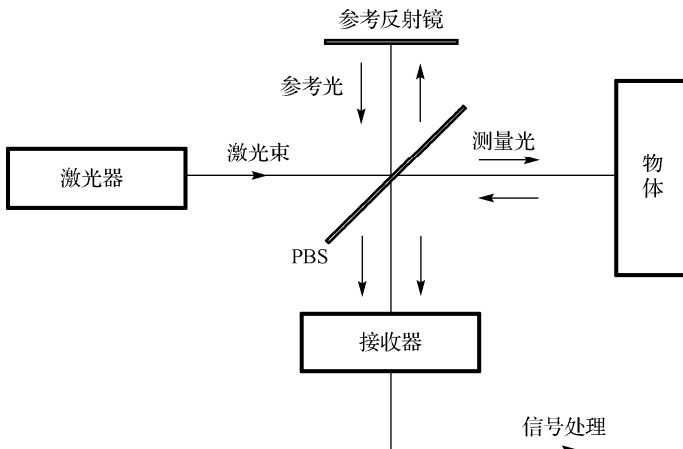


图 2-15 激光测振仪工作原理示意图

由激光器发射出一束稳定的频率为 f_s 的单频激光, 经过一个半透半反分光镜 (PBS) 后被分成两束。其中一束光线作为测量光束透过分光镜后射向被测物体表面, 被测物体振动引起了测量光束发生多普勒频移。另一束光线作为参考光束经过参考反射镜反射后, 通过分光镜与从测量物体反射回来的测量光束一起射向接收器。由多普勒效应可知, 测量光束由于物体振动而发生的多普勒频移即为:

$$\Delta f = f_s \frac{v}{c} \quad (2-28)$$

由式 (2-28) 可知: 通过激光的多普勒频移即可获得被测结构的振动速度。目前的激光测振仪可以直接测量结构的速度振动信号和位移振动信号, 通过微分环节也可以得到相应的加速度振动信号。激光测振仪属于非接触式光学测量技术, 具有传统测振技术所不具备的优势: 如非接触式测量、无附加质量问题; 可实现同时对多个点的数据采集; 可测量非常高的振动频率等。随着现代科技的发展, 激光测振技术发展非常迅猛, 它已经成为一种非常重要的振动测量手段, 广泛地应用于科学实验和工程测量。