

## § 3.10 倾斜角传感器

倾斜角传感器是根据“摆”的工作原理制成的。当传感器壳体相对于地球重心方向产生倾角  $\theta$  时，由于重力的作用，摆锤  $m$  力图保持在铅垂方向，因而相对壳体摆动一个角度(图3.10.1)。如果利用某种传感元件将这个角度量，或者将与摆相连(或者是摆的一部分)的敏感元件的应变变量，转换成电量输出，就实现了倾斜角的电测量。根据不同的转换原理，倾斜角传感器可分为参量式、振弦式和力平衡式三类。

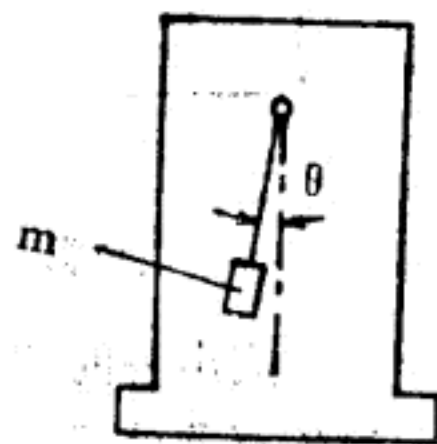


图 3.10.1 倾斜角传感器的工作原理

### § 3.10.1 参量式倾斜角传感器

**工作原理** 参量式倾斜角传感器有应变式、电位器式、电感式、液体摆式等数种。它们的工作原理分述如下：

#### 1. 应变式

倾斜角传感器是参量式的典型，其结构原理如图 3.10.2 所示。图中“3”为应变梁，下端连有摆锤“1”，构成悬挂式摆。应变梁上贴有四片应变片，组成全桥。应变梁周围灌满硅油，形成阻尼使摆易于稳定。为了防水，在电缆引出端充满防水绝缘胶进行密封。

应变梁的形状如图3.10.2(b)所示。将它做成等强度梁的目的是使各截面的应变在某一倾

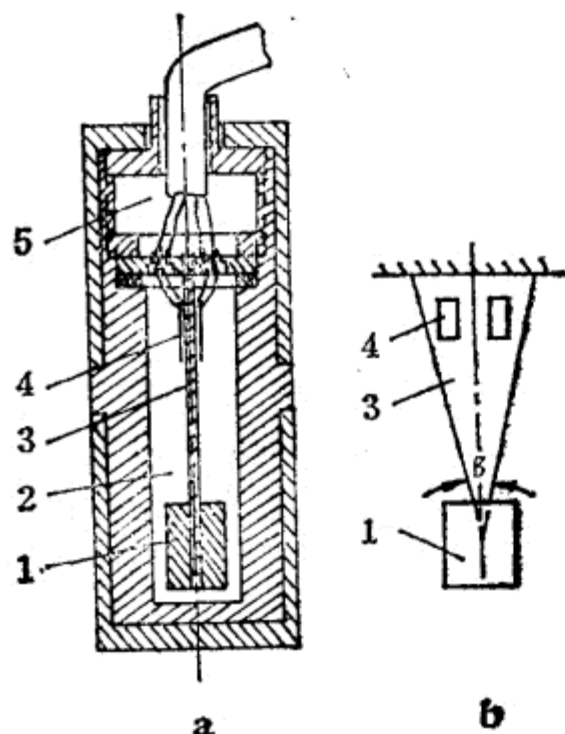


图 3.10.2 应变式倾斜角传感器

1. 摆锤 2. 硅油 3. 应变梁  
4. 应变片 5. 防水绝缘胶

角时均相同。若传感器倾斜  $\alpha$  角，摆锤重  $W$ ，梁厚为  $h$ ，则应变为

$$\varepsilon = \frac{3W \sin \alpha}{E h^2 \tan \beta / 2} \quad (3.10-1)$$

式中  $E$ —梁材料的弹性模量；

$\beta$ —梁的夹角〔见图 3.10.2(b)〕。

传感器倾斜时，由四个应变片组成的全桥就失去平衡。当  $\alpha$  较小时，输出的电量与倾角  $\alpha$  成正比。

## 2. 电位器式

电位器式倾斜角传感器原理见图 3.10.3。在传感器壳体中悬挂一摆锤，电位器固定在壳体上，其电刷与摆锤相连。当传感器壳体倾斜时，电刷随摆锤移动，把电位器  $R$  分成不等的两部分。该两部分电阻与控制盒内的精密多圈电位器  $W$  构成惠斯登电桥。调整多圈电位器使电桥平衡，此时与电位器相连的刻度盘的读数与倾斜角度成正比。

## 3. 电感式

摆锤式电子水平仪是典型的电感式倾斜角传感器。

如图 3.10.4 所示，传感器中一对参数相同的带圆柱形铁心的螺管电感线圈对称地固定

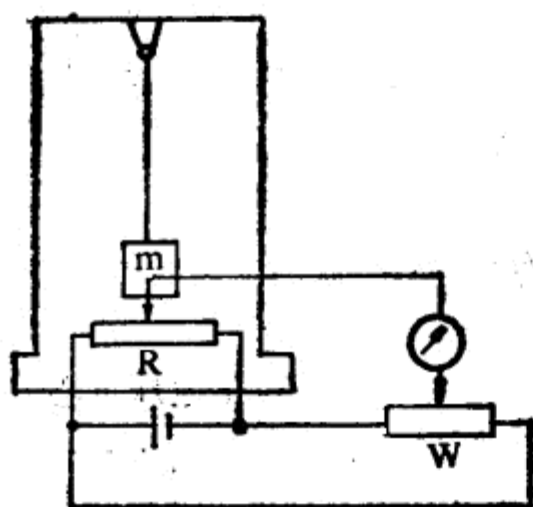


图 3.10.3 电位器式倾斜角传感器原理图

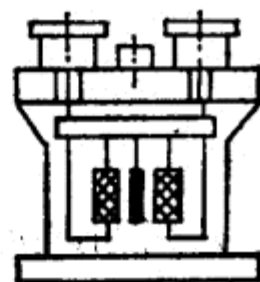


图 3.10.4 摆锤式电子水平仪

在吊架上，构成电桥的两个臂。在铁心间的空隙中，由吊丝悬挂着摆锤，摆锤与铁心一起形成磁路。当传感器处于水平位置时，摆锤在两线圈的正中，电桥平衡无输出；当传感器外壳倾斜时，摆锤受重力作用始终保持铅垂，摆锤与两铁心间的间隙一增一减，电桥失去平衡，经相敏检波电路输出与倾斜角大小成正比、极性与倾斜方向有关的直流电压。

图 3.10.5 是利用差动变压器将倾角转换成电量的传感器。在水平状态时，差动变压器两边的气隙相等，无输出；当壳体倾斜  $\alpha$  角时，由于交叉布置的钢带“2”的作用，重块“3”旋转了  $\beta$  角，且  $\beta > \alpha$ ，造成差动变压器两边气隙的差动性增减而输出电压。

## 4. 液体摆式

电解液气泡式电子水平仪是液体摆式倾斜角传感器的一个例子。它以电极水准器作为水准元件，如图 3.10.6 所示。在普通管状水准器内装以电解液，并在玻璃管内壁贴上四块铂

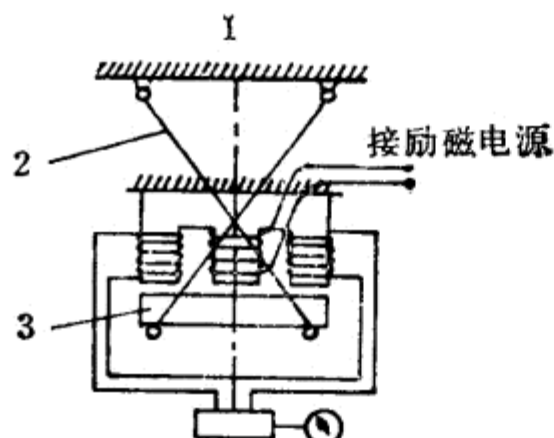


图 3.10.5 差动变压器式倾斜角传感器  
1. 机械本体 2. 交叉布置的钢带 3. 磁铁

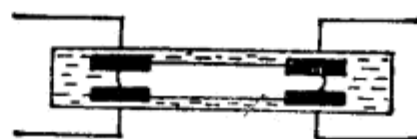


图 3.10.6 电极水准器

电极，按差动交流电桥的原理，将水准器内的气泡和四块电极组成电桥的两个臂。当气泡居中时，两边的电阻值相等，电桥处于平衡状态；当气泡向任一方向移动时，电解液相对于电极的接触面产生变化，引起电阻变化，致使电桥失去平衡，电桥两端产生输出电压。

图 3.10.7 是另一种液体摆式倾斜角传感器的示意图。它与图 3.10.6 的区别在于圆柱形玻璃管内装有三根垂直通过管轴线的铂电极。工作时由于电极浸入导电液的深度发生变化而引起电极间电阻的变化，从而导致电桥不平衡。

如果在相互垂直的两个方向应用上述传感器的原理，就可以构成双轴倾斜角传感器。图 3.10.8 为 SQY—3 型

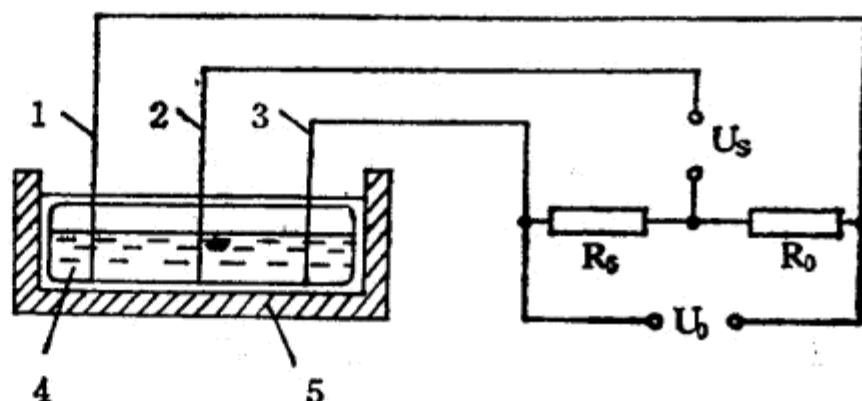


图 3.10.7 液体摆式倾斜角传感器  
1. 2. 3. 铂电极 4. 工作液 5. 圆形玻璃管

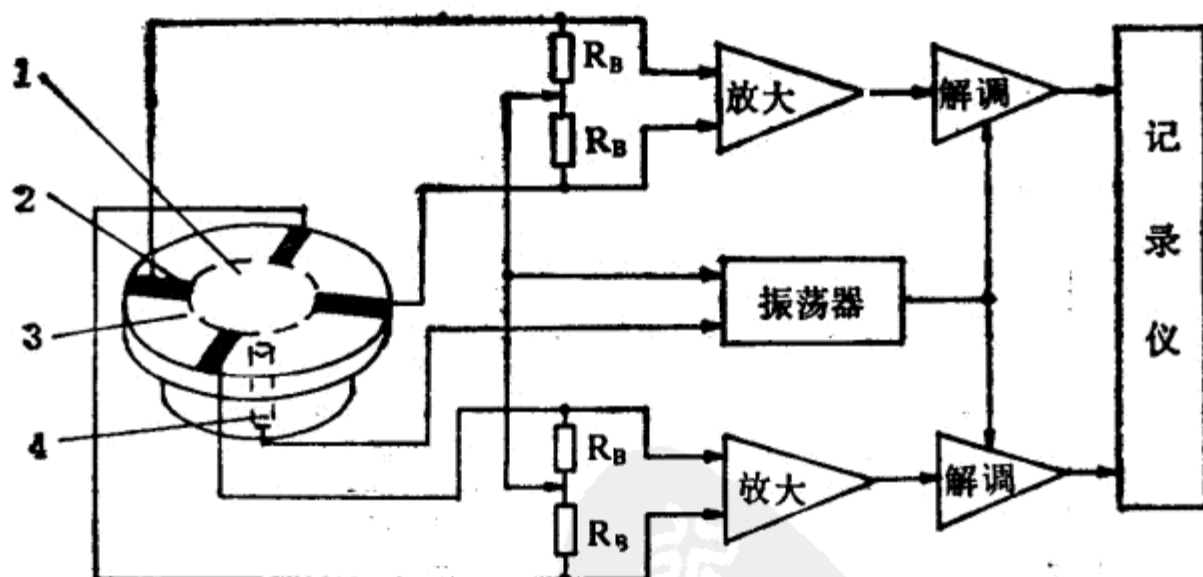


图 3.10.8 双轴倾斜角传感器方框图

1. 圆气泡 2. 铂电极（正交电极） 3. 导电液 4. 公共电极

双轴电子倾角传感器的原理及其测试电路的方框图。该传感器是一个结构特殊的圆形水准气泡。气泡上盖内表面为凹球面，上面精密地镀有四条正交铂电极。气泡底座是个圆形碗，底部中央镀有一圆形铂电极。电极由一空心铂管引出。水准器内充有导电液体，并留有一气泡，见图 3.10.9。四个电极分别与精密电阻  $R_B$  相连，通过公共电极组成二个交流电阻电桥。每一电桥均如图 3.10.10 所示。其中  $R_x$ 、 $R_x'$  为公共电极至正交电极间的电阻。传感器处于水平

状态时，气泡居中，导电液复盖四条正交电极的面积相等，且  $R_x = R_x'$ ，电桥平衡，输出电压  $\dot{U}_0 = 0$ 。传感器倾斜时，气泡移动， $R_x \neq R_x'$ ，电桥失去平衡，输出正比于倾角变化的电压信号  $\dot{U}_0$ ，经放大、解调、滤波后送至记录仪或数字电压表、打印机，即获得倾角大小和方向。

参量型倾斜角传感器还可以做成电涡流式、电容式等，它们除传感元件不同外，原理基本相似。这里不再赘述。

**电 路** 参量式倾斜角传感器的测量电路除差动变压器式能直接输出电压量外，其它一般均采用电桥。其中应变式和电位器式可以采用直流电桥或交流电桥（目前大都采用交流电桥）；电感式、电容式和液体摆式则必须采用交流电桥。

采用交流电桥时，为了辨别倾斜角的方向、减小零位电压，需要采用解调电路（例如相敏检波电路），其典型方框图如图 3.10.11 所示。

**主要性能** 各种参量式倾斜角传感器主要性能如下：

应变式：量程有  $\pm 5^\circ$  和  $\pm 10^\circ$  两种。满量程读数为  $2000\mu\text{V/V}$  和  $1000\mu\text{V/V}$ ；线性度  $\leq 1\% \text{F.S.}$ ；重复性  $\leq 0.2\% \text{F.S.}$ ；滞后  $\leq 0.2\% \text{F.S.}$ ；横向灵敏度  $\leq 0.3\% \text{F.S./}1^\circ$ ；温度漂移  $1\sim 3\mu\text{e}/10^\circ\text{C}$ 。

电位器式：sinco 倾斜公司的 200B 型，测试范围为  $\pm 12^\circ$ ，系统分辨率为 0.1%。

电子水平仪：主要性能见表 3.10.1。

表 3.10.1 电子水平仪的主要性能

刻 度 值		测 量 范 围	
角 度	毫米/米	角 度	毫米/米
20"	0.10	$\pm 8'$	$\pm 2.4$
4"	0.02	$\pm 100''$	$\pm 0.5$
2"	0.01	$\pm 50''$	$\pm 0.25$

英国 T ALYVEL 型尚有刻度值及测量范围比上表小 1/2 的电子水平仪。

电感式：精度 2"。

液体摆式：对电极水准器，其测量范围为  $\pm 10''$ 、 $\pm 50''$ 、 $\pm 100''$ 、 $\pm 8''$ ；分辨率最高可达到 0.2"；线性度 1%F.S.；重复性 0.5%F.S.；电桥电源频率与电解液有关，一般用 400~500Hz。

对液体摆式倾斜角传感器，其测量范围为  $\pm 10^\circ$ ；分辨力 1"，非线性误差在  $+5^\circ$  内  $< 1\%$ ，在  $\pm 10^\circ$  内  $< 3\%$ ；自振频率约 2Hz；电桥供电电压为 6V，频率为 2~10kHz。

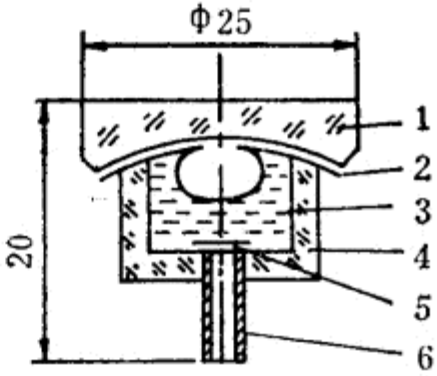


图 3.10.9 圆形水准器

- 1.凹球面上盖 2.正交铂电极 3.电解液  
4.底座 5.圆形公共电极 6.铂管

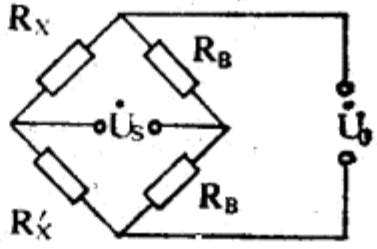


图 3.10.10 交流电阻电桥

对圆形水准器, 其测量范围为  $\pm 8'$ ; 分辨力为  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  弧度; 频率响应为  $0 \sim 0.5 \text{ Hz}$ ; 漂移量为  $0.02''/\text{日}$ ; 使用环境温度为  $-15 \sim +45^\circ\text{C}$ ; 电桥电源为  $6 \text{ V}$ , 电源频率为  $2 \sim 10 \text{ kHz}$ 。

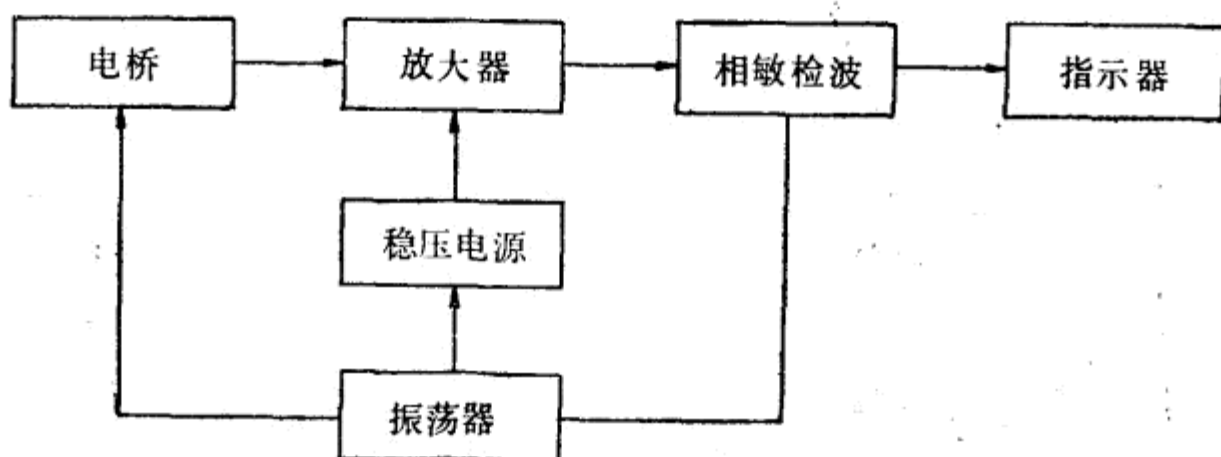


图 3.10.11 测量电路方框图

### § 3.10.2 振弦式倾斜角传感器

**工作原理** 图 3.10.12 是振弦式倾斜角传感器的原理与结构图。图中 1 是扁条形簧片, 上端固定在轴 2 上, 下端设有可调整高度的质量块 3。轴 2 支承在滚动轴承上, 其上固定有一偏心块 4。振弦 5 凸出地固定在簧片 1 的中部。7 为固定在外壳 6 上的电磁铁, 它的极 8 呈环形。测量时偏心块 4 顺从倾斜方向摆动, 使簧片 1 转动而自动置于工作方位。由于质量 3 的作用使簧片弯曲, 改变了振弦 5 的张紧状态, 使其固有频率发生变化。电磁铁 7 的作用是激发振动, 并输出随倾斜角而变的频率信号。振动频率为

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\Sigma E}{\rho}} \quad (3.10-1)$$

式中  $l$ —振弦的长度;

$\varepsilon$ —振弦的应变;

$E$ —振弦材料的弹性模量;

$\rho$ —振弦材料的密度。

或表示为

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{T/m_e} \quad (3.10-2)$$

式中  $T$ —振弦的张力;

$m_e$ —振弦单位长度的质量。

图 3.10.13 是另一种振弦式倾斜角传感器。图中 1 是外壳。杆 2 垂直悬挂在簧片支承 3 上。质量 4 固定在 2 上, 形成悬挂式摆。正好位于悬挂支点处的杠杆短臂 6 与杆 2 垂直相连。振弦 7 上端固定在短臂 6 上, 下端与壁 8 相连。电磁铁 9 置于振弦 7 附近, 激发其振动并输出电信号。为了提高摆的稳定性, 摆锤 4 周围充有硅

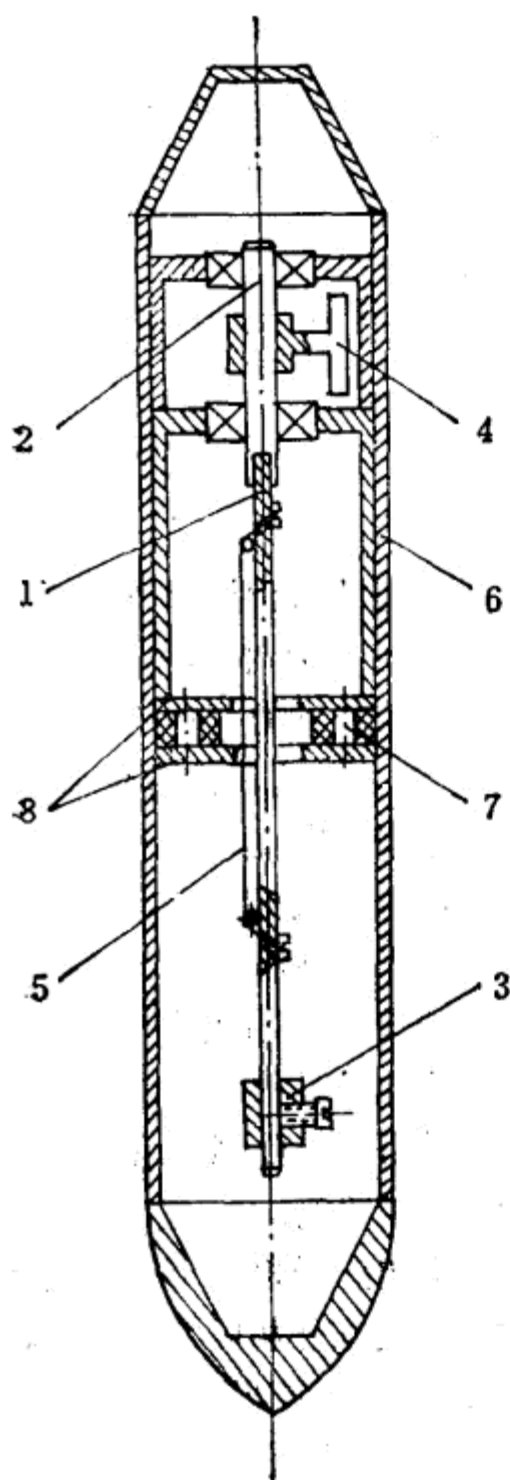


图 3.10.12 振弦式倾斜角传感器  
结构图之一



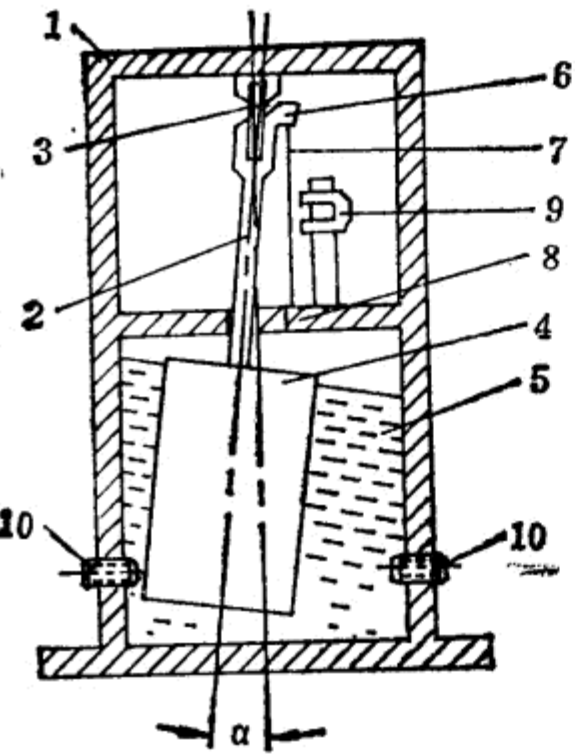


图 3.10.13 振弦式倾斜角传感器  
结构图之二

油阻尼液 5。调节螺钉 10 用于在运输过程中制动摆锤而防止传感器损坏。

**主要性能** 上述两种振弦式倾斜角传感器中，前一种分辨力为几角分，后一种分辨力为 0.3 角秒。

振弦式倾斜角传感器的最大优点是频率输出易于与计算机配合，而且性能稳定，能长期使用不需校准。但由于频率  $f$  与张力  $T$  成抛物线关系，在要求高的场合应考虑非线性校正。

§ 3.10.3 力平衡式倾斜角传感器

**工作原理** 这种传感器实际上是一个反馈测量系统。如图 3.10.14 所示。被测倾斜角通过传感器变成电量，经放大后输出的电量通过反向传感器再变换成偏转角度，力图使传感器恢复零位平衡状态。由于输入反向传感器的电量（即放大器输出电量）与偏转角度成比例，因此放大器输出的电量就代表了被测倾斜角的大小和方向。力平衡式传感器始终工作在零位附近，其特性基本上取决于反向传感器，所以具有较高的精度和分辨力，以及优良的响应特性。

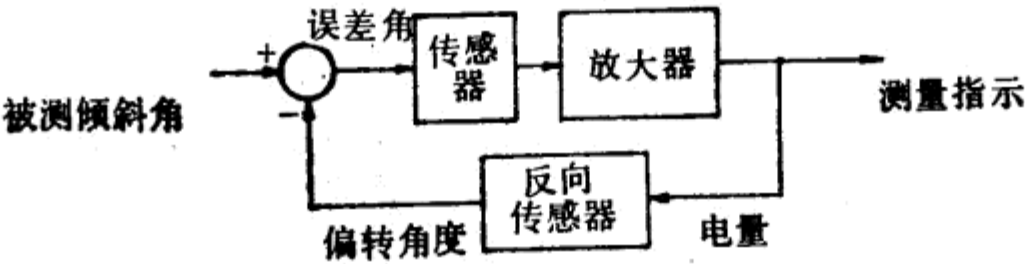


图 3.10.14 力平衡式倾斜角传感器原理方框图

图 3.10.15 为 CMS 型力平衡式倾斜角传感器的工作原理图。光电元件  $PTR_1$ 、 $PTR_2$

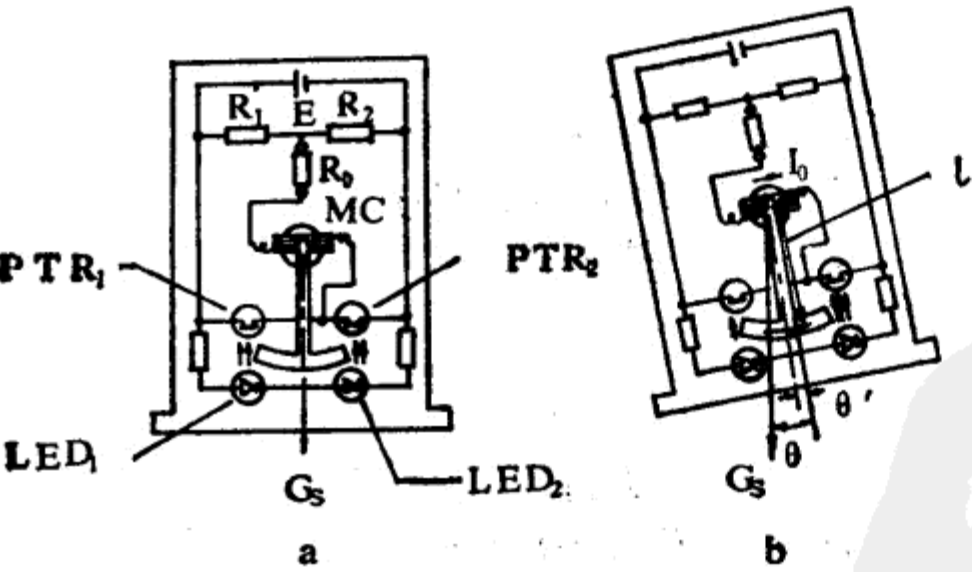


图 3.10.15 CMS 型倾斜角传感器的工作原理图

于重力作用而产生不平衡力矩，如图 3.10.15(b) 所示。只要偏离原始位置  $\theta'$  角，遮光片产生偏移，就使光电元件  $PTR_1$  和  $PTR_2$  的电阻发生变化，电桥失去平衡，在可动线圈中流过电流  $I_0$ 。该电流产生一个使遮光片作反向运动的力矩，直至两者平衡时为止。这时的电流  $I_0$  就是输出电流。

和电阻  $R_1$ 、 $R_2$  构成直流电桥。直流电表机构的可动线圈和负载电阻  $R_0$  接在电桥的对角线上，作为不平衡电流的检测回路。在可动线圈的端部装置有一块遮光片  $S$ ，当传感器处于地球重心  $G_s$  方向时，遮光片处于发光元件和光电元件的中间位置，两光电元件分别接收到等量的光通量，电桥平衡。

当传感器相对  $G_s$  倾斜  $\theta$  角时，可动部件相应发生偏离。由

可动线圈的力矩  $T$  为

$$T = KI_0 \quad (3.10-3)$$

式中  $K$ —比例常数。

可动部件重量产生的不平衡力矩为

$$M = gl \sin(\theta - \theta') \quad (3.10-4)$$

式中  $g$ —遮光片的重量；

$l$ —由可动部件中心到遮光片重心的距离。

平衡时,  $T = M$ , 即  $KI_0 = gl \sin(\theta - \theta')$ , 所以

$$I_0 = \frac{gl}{K} \sin(\theta - \theta') \quad (3.10-5)$$

由于设计时使  $\theta \gg \theta'$ , 所以输出电流为

$$I_0 = \frac{gl}{K} \sin \theta \quad (3.10-6)$$

即输出电流与倾斜角的正弦成正比。当  $\theta$  很小时,  $I_0$  与  $\theta$  成正比。

**主要性能** CMS 型力平衡式倾斜角传感器的主要性能见表 3.10.2。

表 3.10.2

CMS 型倾斜角传感器的主要性能

测 量 范 围		CMS—05 A—XY	CMS—90
测 量 范 围		X 方向 $\pm 5^\circ$ Y 方向 $\pm 5^\circ$ } 二座标	$\pm 90$
分 辨 力		1.0' (5° 的 0.3%)	4 $\mu$ A/12'/cos $\theta$
精度 (20 $\pm$ 5℃)		$\pm 3'$ (5° 的 $\pm 1\%$ )	$\pm 10 \mu$ A/ $\pm 36'$ /cos $\theta$
使用温度范围		-20 ~ +70℃	
输 出	与倾斜角的关系	成 正 比	与 sin $\theta$ 成正比
	输 出 电 流	X 方向 $\pm 500 \mu$ A/ $\pm 5^\circ$ Y 方向 $\pm 500 \mu$ A/ $\pm 5^\circ$	$\pm 1$ mA/ $\pm 90^\circ$
	负 载 阻 抗	2 k $\Omega$ (1 V 以下)	1 k $\Omega$ (1 V 以下)
响 应 时 间		0.5 秒以下	

根据力平衡式传感器的工作原理, 一些力平衡式加速度计都可以用作高精度、高分辨力的倾斜角传感器。它们的工作原理请参见加速度传感器分册。

各种倾斜角传感器虽然工作原理不尽相同, 但高灵敏的摆是提高它们性能(主要是分辨力)的共同关键。因此有关研究单位和生产厂都致力于将各种灵敏支承应用到这种传感器上。同时, 随着科学技术的发展和对倾斜角测量、控制要求的提高, 力平衡式传感器也越来越受到重视。目前, 倾斜角传感器在建筑结构试验、土建工程(铁路、桥梁、水坝等)侧向变形和倾角变化的测量、大型设备零部件的角度和角位移的测量、炮位射角的校对、惯性导航平台的控制以及地震监测等领域都获得广泛的应用。