

- (1) 将整个圆的圆心角分为 6000 等分, 每一等分为一“密位”。因此, 1 密位 = 3'36"。
- (2) 将整个圆的圆心角分为 6400 等分, 每一等分为一“密位”。因此, 1 密位 = 3'22".5。

§ 3.2 电阻法

§ 3.2.1 线绕电位器式

工作原理 线绕电位器式角位移传感器的工作原理如图 3.2.1 所示。它是将传感器的转轴与被测角度的转轴相连。当被测物体转过一个角度时, 电刷在电位器上有一个相对应的角位移, 在输出端就有一个与转角成比例的电压信号输出。

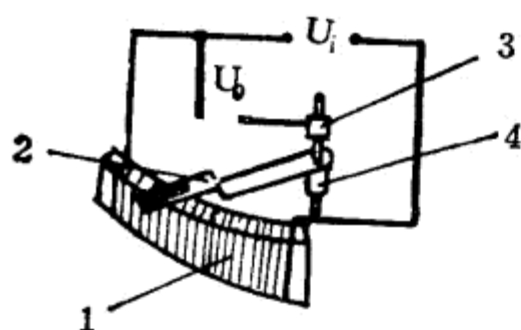


图 3.2.1 电位器式角位移传感器工作原理图

1. 电位器 2. 电刷 3. 导电环
4. 转轴 U_i : 电位器端电压
 U_o : 输出电压

线绕电位器式角位移传感器的设计计算主要是对环形电位器的计算。下面举几个主要参数的计算方法。

1. 根据给定的总误差确定阶梯误差 e

一般 e_j 为总误差的 1/3。

2. 求绕组的总匝数 N

$$N \geq \frac{1}{2e_j} \quad (3.2-1)$$

3. 求骨架直径 D

$$D_a = \frac{2M}{\mu P} \quad (3.2-2)$$

式中 D_a —骨架平均直径(cm);

M —电刷转轴的起动力矩(g·cm);

μ —电刷与电位器的摩擦系数;

P —电刷接触压力(g)。

设骨架的厚度为 b , 则骨架的内直径为

$$D = D_a - b \quad (3.2-3)$$

4. 根据工作转角 α 求出导线长度 L_0 。

$$L_0 = \frac{\alpha}{360} \pi D \quad (3.2-4)$$

5. 求出导线直径 d

$$d = \frac{L_0}{N} - 0.03 \quad (3.2-5)$$

式中 0.03 是环形电位器导线匝间间隙。

6. 求总电阻 R

$$R = \frac{U_i}{\frac{\pi d^2 j}{4}} \quad (3.2-6)$$

式中 U_i —电位器端电压(V);

j —允许电流密度(A/mm²)。

7. 确定骨架高度 h

一匝导线长度 L_0 为

3.2.17 所示。这时 R_W 与 R_H 串联后起分压作用，并且它的变化会引起输出电压的变化。为此输出端要连接高阻抗的变换器，以便得到稳定的输出。其实用方框图如图 3.2.18 所示。

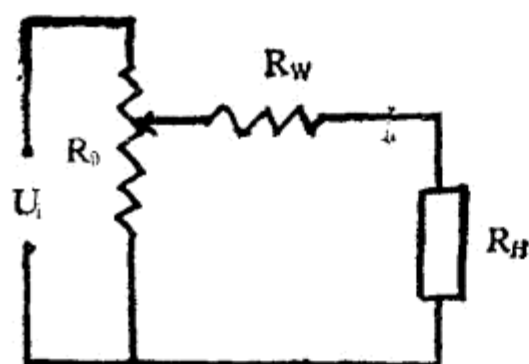


图 3.2.17 光电电位器接触电阻

R_0 光电电位器电阻 R_W 接触电阻
 R_H 负载电阻 U_i 电位器端电压。

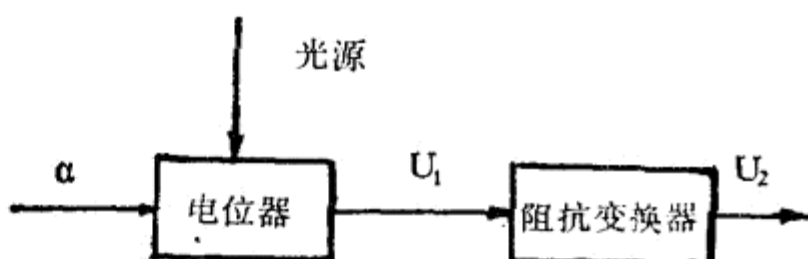


图 3.2.18 光电电位器实用方框图

主要性能

1. 测量角度： $0 \sim 330^\circ$ (可以对称输出)；
2. 电位器阻值：几 k 至几十 $k(\Omega)$ ；
3. 光接点电阻比： $10^5 \sim 10^8$ ；
4. 线性度：修刻后达 3 %；
5. 分辨率：较高；
6. 工作温度范围： $-40 \sim +70^\circ\text{C}$ ；
7. 工作寿命：决定于灯泡寿命。

光电电位器式角度传感器由于没有附加对仪表系统有害的力矩（如金属丝电刷有摩擦力矩），因此它有很高的分辨率，很长的寿命；它没有迟滞，没有惯性，具有很高的扫描速度；没有共振频率，没有活动的集电装置（如金属丝电刷的集电环）。它是一个较理想的传感器。

该传感器的缺点接触电阻比较大。因此信号要经过阻抗匹配变换器才能输出，从而使结构复杂。

由于接触电阻 R_W 正比于导电层窄缝的宽度，因此为了减小 R_W ，应使窄缝尽量小。

采用半导体工艺制造光电电位器，由于工艺成熟，可以保证在批量生产中重复性好，而时间常数可以从毫秒级减到微秒级。

光电电位器式角度传感器已作为一种新型的传感器正在受到人们的重视。

现将光电电位器与线绕、非线性绕电位器进行比较，其结果列于表 3.2.3 中。

§ 3.2.4 风标式

利用风标对气流方向敏感的特性，可以制成风标式迎角传感器。迎角（又称攻角）是指飞行器的纵轴与飞行速度之间的夹角。随着空间技术的不断发展，新飞行器的不断出现，迎角

表 3.2.3 光电电位器与线绕、非线绕电位器比较表

项 目 \ 类 型	线 绕 电 位 器	金属陶瓷电位器	合成膜电位器	光电电位器
阻 值 范 围	低—中	低—高	中—高	中—高
分 辨 率	较差	好	好	好
电阻温度系数	低	中	高	中
工 作 寿 命	低	高	高	高
抗 潮 性	好	好	差	好
高 频 特 性	差	好	好	好
附 加 力 矩	有	有	有	无

的测量显得愈来愈重要。对升力系数 C_y ，在飞行器翼型一定的情况下，它主要和迎角(α)有线性关系。当超过某一临界迎角时(即失速角 α_s)，升力系数很快下降。因此迎角传感器通过测出失速角得到最大升力系数，发出失速警告；测出最佳迎角得到最短起飞、着陆距离；还可以得到飞行器的各种机动特性。

采用风标式迎角传感器可以测得飞行器迎角，因为它可以装在飞行器机头的前方，位于气流的自由流场区域。

工作原理 风标式迎角传感器的工作原理如图 3.2.19所示。

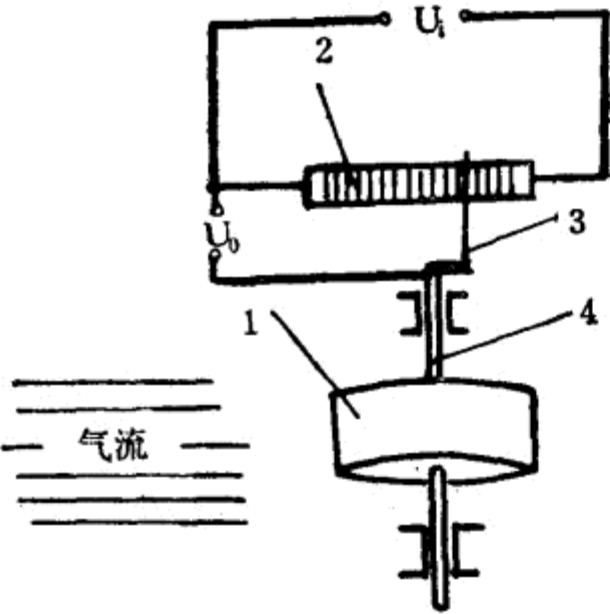


图 3.2.19 风标式迎角传感器原理图
1. 风标 2. 电位器 3. 电刷 4. 转轴
 U_1 · 电位器端电压 U_0 · 输出电压

当风标经过静平衡处理后，它的位置始终停留在与迎面气流速度相平行的方向上。将传感器与飞行器的纵轴平行安装。当气流(飞行速度)与风标方向一致时，风标压差为零，风标不动；当气流方向与风标方向不一致时(即飞行器有一迎角)，气流在风标上形成压力差，其方向垂直于风标表面，使风标绕转轴转动，直到与气流方向一致为止，这个转角就是迎角。随着风标的转动，电刷在电位器上移动，输出与转角成比例的电压讯号。

风标式迎角传感器实际应用方框图如图 3.2.20 所示。

单风标迎角传感器稳定性差，输出讯号小，因此实际使用的均是双风标的结构形式。

结 构 风标式迎角传感器往往与测滑角传感器

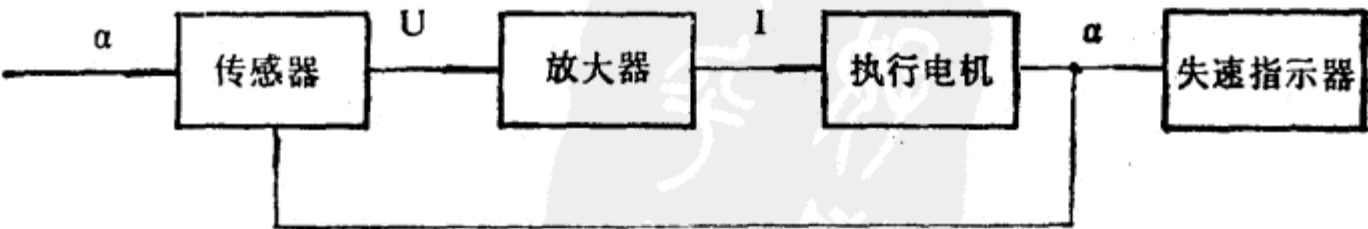


图 3.2.20 迎角传感器实用方框图

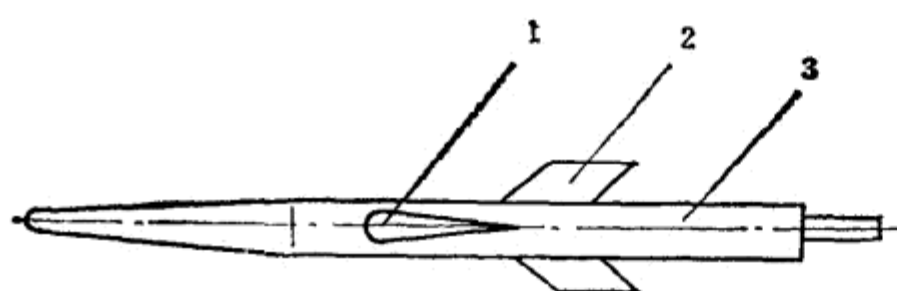


图 3.2.21 风标式迎角传感器外形图

1. 迎角传感器 2. 侧滑角传感器 3. 壳体

风标是该传感器的敏感元件。它的几何形状要求很高，两风标要严格一致。为了减小在大气中的摩擦，表面要求光亮，一般镀硬铬保护层，组装后的两风标要严格的对称。

2. 配重

为了使风标得到静平衡（这一点对测量精度是非常重要的），必须加配重块。为了减小体积，一般采用高比重合金。但高比重合金加工困难，往往需要采用电火花、线切割等工艺进行加工。

配重和风标是通过转轴来连接的。结构上要求三者刚性固紧，任意二者之间微小的相对位移都将直接造成测量误差。

轴承要经过严格的挑选和配对，以便转轴（即风标）转动灵活。

3. 电刷和电位器

它们是传感器的信号输出装置。这里必须强调，由于传感器装在飞行器机头的前方，在高速飞行的情况下，瞬时温升将是很高的，因此对电刷、电位器、焊接材料的选择是很严格的。

4. 壳体

用于高速飞行器的传感器因摩擦发热，要求壳体耐高温，可采用不锈钢材料表面镀硬铬。若用于低速飞行器的传感器，壳体可用铝合金材料。

主要性能 风标式迎角传感器是在气动力作用下工作的，因此它的标定一般是在风洞里进行的。标定时采用给定的马赫数改变角度，进行循环测试，最后得出 $U_0 = f(\alpha)$ 特性曲线。目前这种传感器的主要性能如下：

1. 测量范围： $\pm 15 \sim \pm 20^\circ$
2. 总精度： $\leq 1\%$ ；
3. 灵敏限：在工作压力 $1200 \text{ kg}/\text{M}^2$ 时为 0.1° ；
4. 电位器电阻值：1 k(Ω)左右；
5. 最大马赫数：4.5；
6. 工作温度： $-50 \sim +50^\circ\text{C}$ 。

由于迎角传感器可以测量飞行器的升力系数、失速角度、选择最短起飞和着陆距离等各种功能，因此国外（美、英、法、日等）都很重视迎角系统的应用。如迎角指示器、自动驾驶仪、失速警告器、大气中心仪等。风标式迎角传感器能测量迎角，能在从低音速区到高音速区大范围内良好的工作。但测量角度较小，并且精度受限于静平衡的质量及因风标受摩擦后引

（与迎角传感器成 90° 安装）装于一体。它们的工作原理和结构是一样的，其外形如图 3.2.21 所示。

迎角传感器的结构如图 3.2.22 所示。它主要由双风标、配重、电刷、电位器、转轴、壳体组成。下面将逐一介绍。

1. 风标

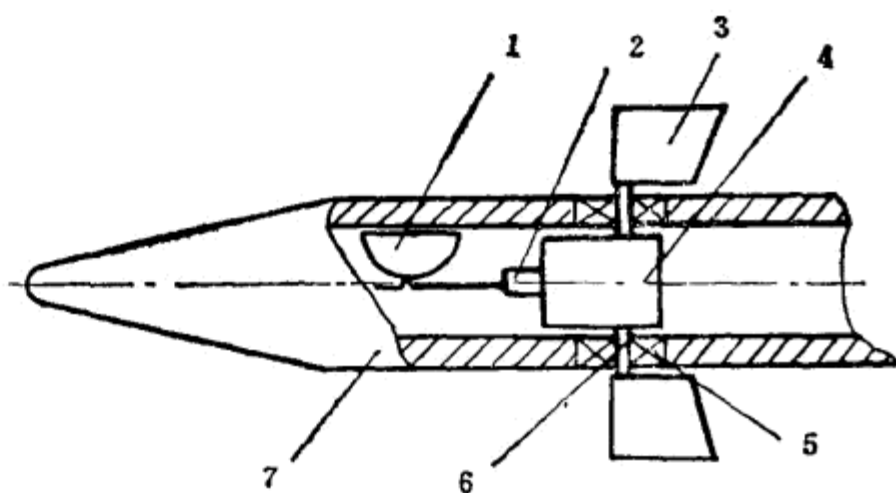


图 3.2.22 风标式迎角传感器结构示意图

1. 电位器 2. 电刷 3. 风标 4. 配重 5. 轴承 6. 转轴 7. 壳体

起的误差。

§ 3.2.5 压差归零式迎角传感器

用来测量迎角的传感器还有：

1. 归零风标式

它与上面风标传感器的原理是一样的，只是内部结构不同(见图3.2.23(a))。这种传感器只适宜测局部迎角。

2. 压力比式

这种传感器在圆锥头的半圆头部上，下两侧对称的开有两只小孔(见图3.2.23(b))。当探头对称线对准气流方向时，两小孔的气流压力相等；当有迎角时，上、下两孔的压力不等，其压力进入膜盆式压差传感器内，通过电位器的输出可以得到迎角值。

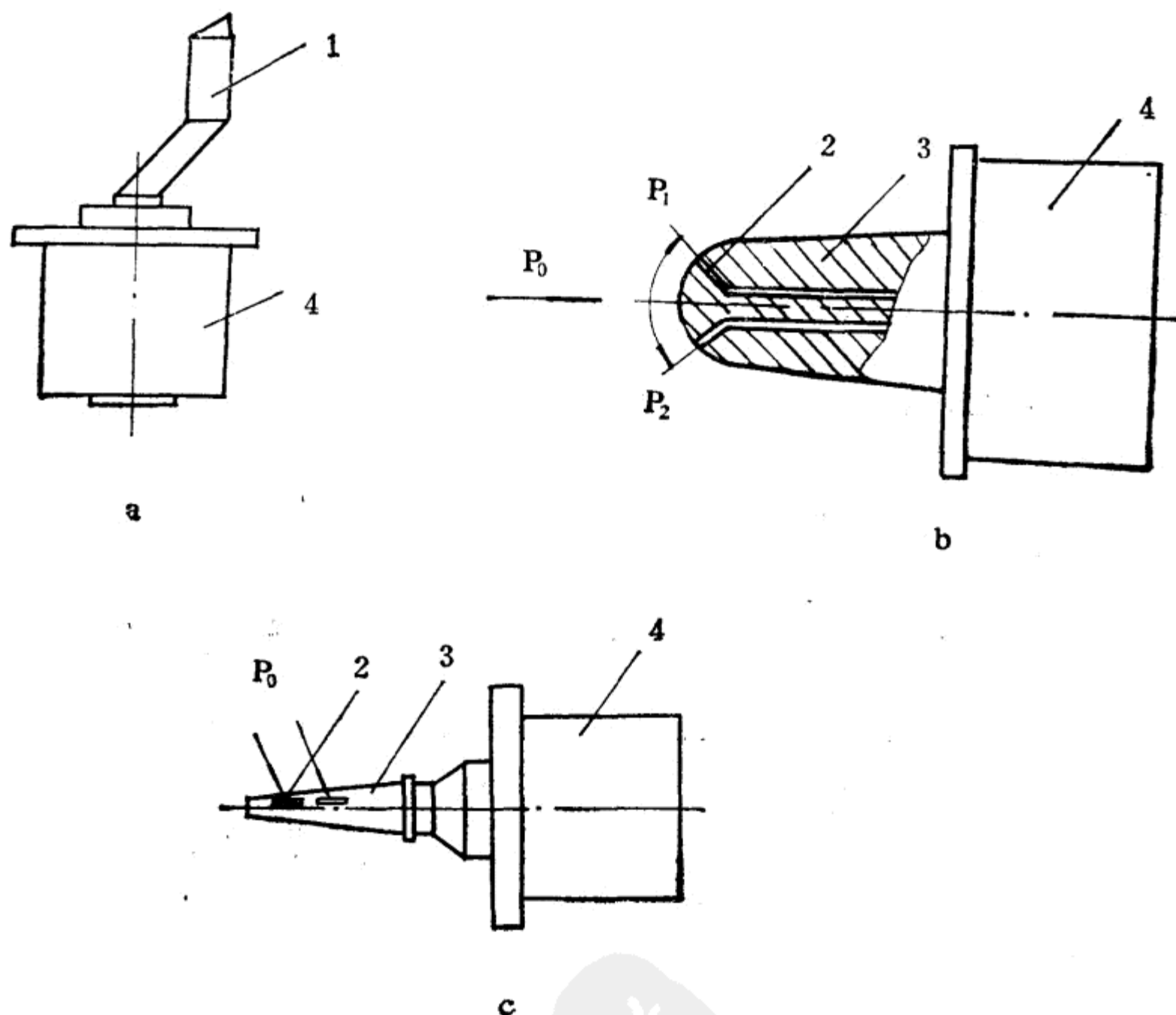


图 3.2.23 迎角传感器外形图

a. 风标归零式 b. 压力比式 c. 压差归零式 1. 风标 2. 窄缝 3. 探头 4. 基体 P_0 、 P_1 、 P_2 气流压力

3. 压差归零式

它的外形图如图3.2.23(c)所示。

压差归零式迎(攻)角传感器安装在飞行器(飞机或导弹)机头或机身前段的两侧面，用来测量飞行器与瞬时受扰气流间的局部迎(攻)角，并通过同步器把输出与迎(攻)角变化成正比的电信号，传送给迎角指示器和其它控制系统。

工作原理 该传感器安装在飞行器机头或机身前段的两侧，只让探头伸入到平稳的气流

中(气槽迎着气流)。当飞机迎(攻)角不变时,每对气槽上感受到的压力相等;当飞行器迎(攻)角改变时,在改变的瞬时就会使一对进气槽感受到的压力增加,另一对进气槽感受到的压力降低。这两个不相等的压力通过各自的通道作用到叶片两对相反的叶面上,其合力(即压差 ΔP)便产生一个与改变迎(攻)角方向相反的气动机械反馈力矩,使探头转轴组件转动,直到两对进气槽感受的气压相等的初始位置为止。当探头转轴组件移动时,与探头同轴的转子便与定子的绕组产生角位移,从而输出与迎(攻)角变化成正比的电压信号。

工作原理方框图如图3.2.24所示。

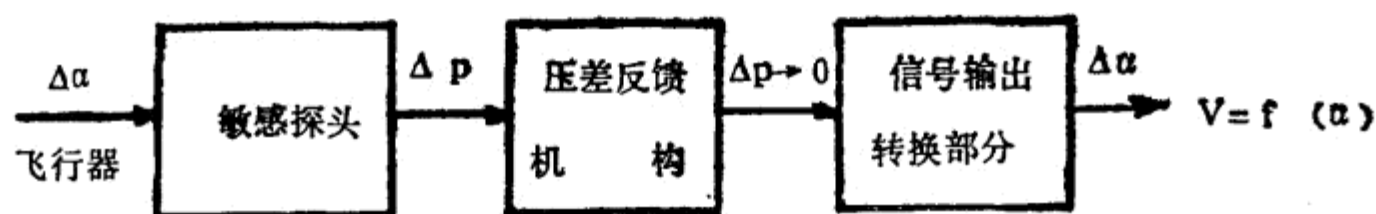


图 3.2.24 压差归零式迎(攻)角传感器工作原理方框图

由于相对气流受飞行器外形的影响,因此它测量的是飞行器纵轴与瞬时受扰气流之间的局部迎(攻)角,其动态特性则由前座、后座、叶片组成的阻尼腔通过阻尼孔与大气相通来调节。

结 构 压差归零式迎(攻)角传感器的结构如图3.2.26所示。它由四大部分构成,即敏感部分、变换转动机构、信号转换输出部分和加热部分。

敏感部分包括探头组件(锥套、隔板、管咀、转轴等);变换转动机构包括前座、后座、叶片、滤网等;信号转换输出部分包括三组同步器;加热部分包括探头加热器、壳体恒温器和温度继电器等。

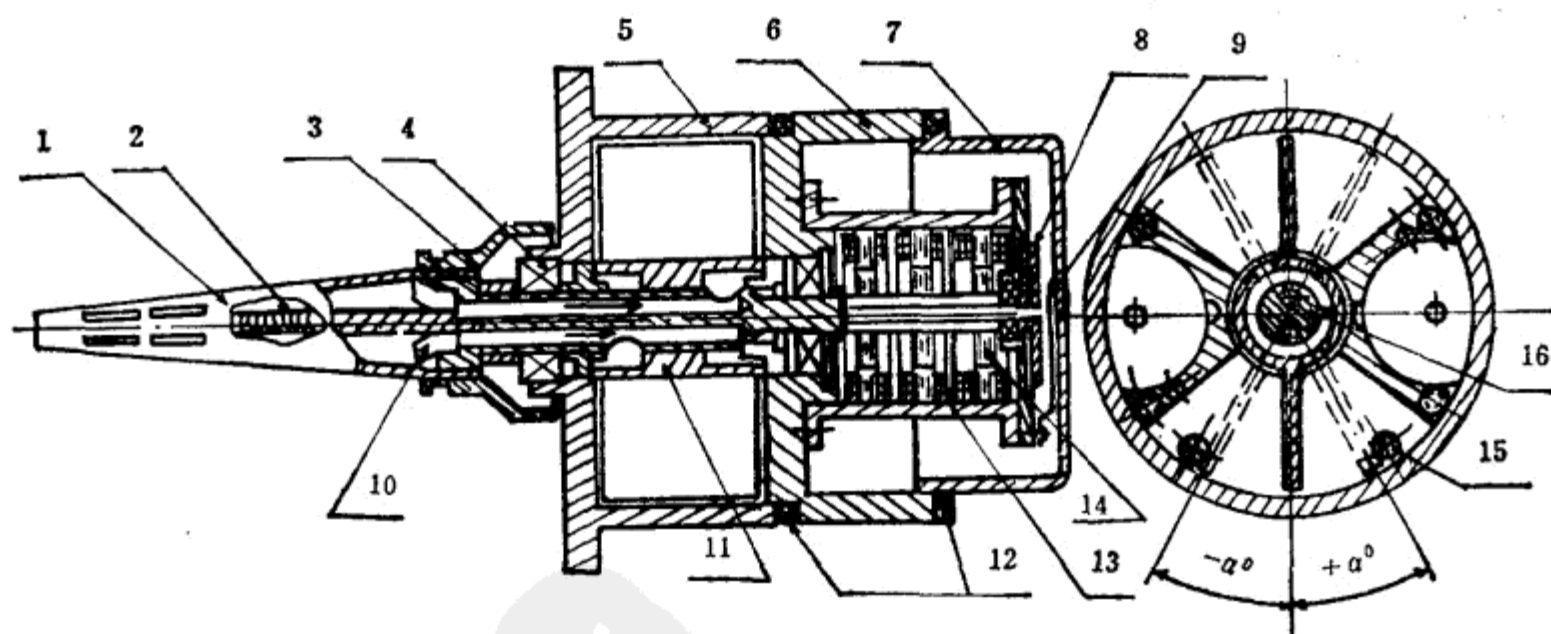


图 3.2.25 压差归零式迎(攻)角传感器结构图

1. 探头组件 2. 加热器组件 3. 防尘罩 4. 滚动轴承 5. 前座 6. 后座 7. 后盖 8. 平衡块
9. 导电片 10. 管咀 11. 叶片 12. 密封圈 13. 同步器组件 14. 转子 15. 挡块 16. 键

主要性能

1. 测量范围(误差 $\pm 1^\circ$)

有 $-5 \sim +20^\circ$ (总共 25°); $-15 \sim +15^\circ$ (30°); $-20 \sim +20^\circ$ (40°); $-25 \sim +25^\circ$ (50°); $-30 \sim +30^\circ$ (60°); $-10 \sim +50^\circ$ (60°)。

2. 精度

$\leq 3.5\%$ 。

3. 分辨力

$5 \sim 10'$ 。

4. 动态特性

回零过渡过程时间： 0.075 ± 0.025 秒；

固有频率： $5 \sim 7$ Hz。

5. 信号输出

可根据不同用途输出：一组或三组电信号。每组同步器输入绕组电阻 $105 \pm 10\Omega$ 。输出电阻为 $100 \pm 10\Omega$ 。

同步器工作电压： 2400 Hz, 6 V。

6. 加热系统

防冰功率： ≥ 80 瓦

探头加热器和壳体恒温器并联电阻 $6 \sim 9\Omega$ ；

探头加热器电阻： $9 \sim 10\Omega$ ；

壳体恒温器电阻： $19 \sim 20\Omega$ ；

加热系统公用直流电压： 27 ± 2.7 V

压差归零式迎(攻)角传感器可用于运输飞机、轰炸机、歼击机、无人飞机中失速警告系统, 自动驾驶仪、大气数据中心仪、阵风阻尼器、火控计算机平视显示仪等。也可用于新型飞机或导弹性能飞行试验。

§ 3.2.6 应变计式

工作原理 电阻应变片是一种能将机械应变转换为电阻变化的敏感元件。它不仅能够直接用来测量各种试件的应力应变, 而且还能和各种型式的弹性元件配合制成各种应变式传感器。应变式角位移传感器就是其中一种。

电阻应变片的“应变效应”公式为

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (3.2-9)$$

式中 $\Delta R/R$ —应变片的电阻值相对变化；

K —应变片的灵敏度；

ε —弹性元件受力产生的应变。

对于金属电阻应变片, $K = 1 \sim 2$, 对于半导体应变片, $K = 60 \sim 170$ 。

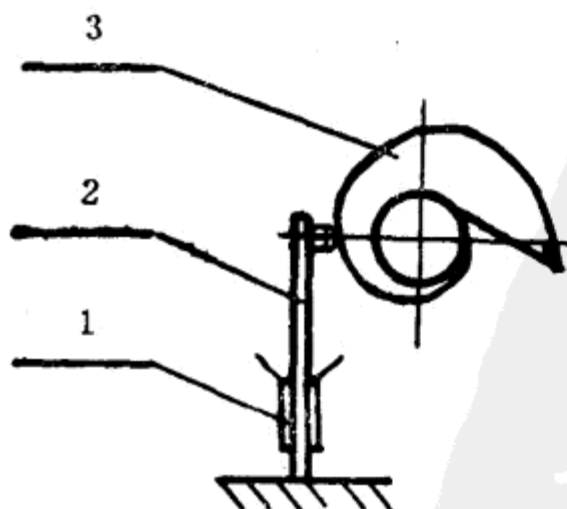


图 3.2.26 角位移传感器原理图

1. 应变片 2. 悬臂梁 3. 螺旋轴

应用应变片的“应变效应”制成的角位移传感器如图3.2.26所示。由图可见, 当螺旋轴转动一定角度, 弹性元件——悬臂梁受力后产生变形。粘贴在悬臂梁上的应变片可将其变形量的变化转换为电阻值的变化。用测量电桥和指示仪器测量该电阻值的变化即可确定螺旋轴转动角度的大小。

结构 应变计式角位移传感器结构如图3.2.27所示。它主要由悬臂梁、应变片、螺旋轴、外壳、上盖及底板等组成。其中悬臂梁的选材及设计计算(详见§1.2.2)是整个结构设计的关键。螺旋轴的形状设计及加工精度直接影响传感器的线性度。为了保证角位移与输出成线性关系, 它的形状应设计成如图3.2.28所示的展开形状。其中 δ 表示悬臂梁自

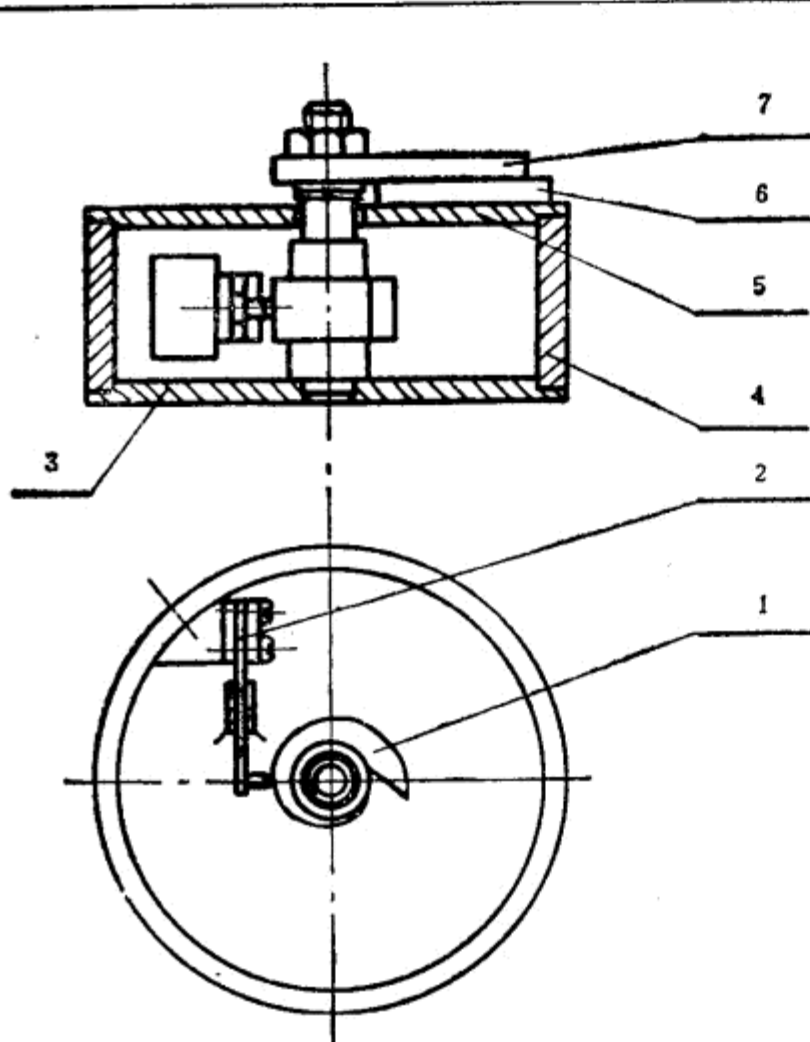


图 3.2.27 应变计式角位移传感器的结构示意图

1. 螺旋轴 2. 悬臂梁组 3. 底板 4. 外壳 5. 上盖
6. 固定尺 7. 动标尺

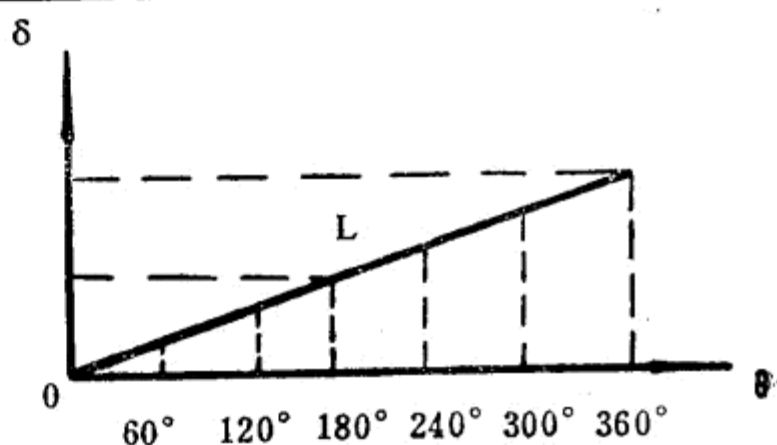


图 3.2.28 螺旋轴展开图

由端挠度线； θ 表示圆周 L 表示螺旋线。 δ_{max} 表示 360° 角位移时悬臂梁自由端产生的最大挠度。应变片和粘合剂的选用及粘贴工艺(详见 § 1.2.2)，也是传感器性能好坏的关键。

电 路 应变片输出的电阻值变化很微弱，难以直接测量，通常是采用测量电桥将其转换为电压或电流，再经放大器加以放大，供指示仪表读数。这些都是通用线路在此不作详细介绍。整个测量电路可以完整地安排在传感器壳体内。如和自补偿应变片配合可使整个传感器性能非常稳定可靠。

该传感器的最大特点是测量范围大，可测量 $\pm 180^\circ$ 以内的任何角位移；应用范围广，它不但能测角位移和角度，稍加改进还可以测量倾角。

§ 3.2.7 流向方位传感器

工作原理 流向传感器用来测定流体(如水)的流向方位，其工作原理如图3.2.29所示。

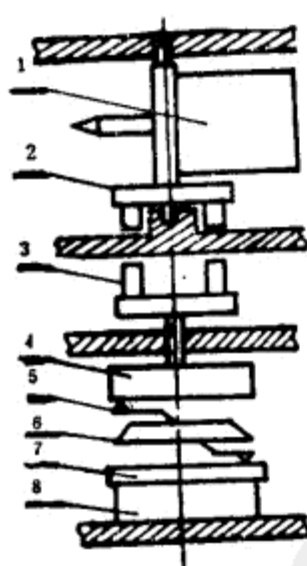


图 3.2.29 流向方位传感器的原理结构图

1. 方向舵 2, 3. 磁性连动器 4. 测量电位器 5. 弹性接触片
6. 磁罗盘 7. 导电环 8. 电磁感应线圈

流向传感器配合萨沃纽斯转子(详见 § 4.5 中图4.5.1)一起既测流速又测流向方位。关于测流速部分在 § 4.5 中有详述，这里重点说明流向方位的测量。水流作用在萨沃纽斯转子上的同时，也作用在方向舵1上，使方向舵绕轴转过某个角度(代表水流的某个方位)，磁性连动器2随方向舵一起同轴旋转至某个角度。而磁性连动器3由于和磁性连动器2的磁性相互作用，使得磁性连动器3和它同轴的测量电位器4也一起与方向舵同步旋转至某个方位角。

为了指示这个方位角的大小，采用磁罗盘6，并在磁罗盘上下两测各固定一个弹簧片。上部弹簧片和电位器接触相当于电位器的滑动触点，下部弹簧片和电磁感应线圈8上端的导电环7相接触(当电磁感应线圈中通过一定频率的交流电时)。由图3.2.30可知，当电位器和弹簧片接触的位置不同时(即代表不同的方位角)，使电路中的电压频率变换器输出的电压频率也就不同。因此，我们可用电压的频率大小来指示方向舵的转动方位，从而知道水流流向。

结 构 在图3.2.29中，测量电位器采用精密线绕电位器。它装在密封的壳体内。

$$L_o = \frac{\pi d^2 R}{4 \rho N} \quad (3.2-7)$$

式中 ρ —导线电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)。

$$h = \frac{L_o}{2} - b \quad (3.2-8)$$

典型的环形电位器如图 3.2.2 所示。

结 构 线绕电位器式角位移传感器的结构如图 3.2.3 所示。

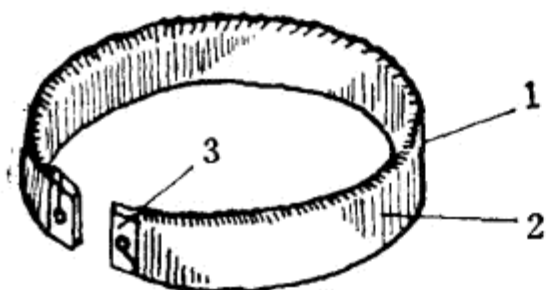


图 3.2.2 线绕环形电位器
1. 骨架 2. 电阻丝 3. 引线片

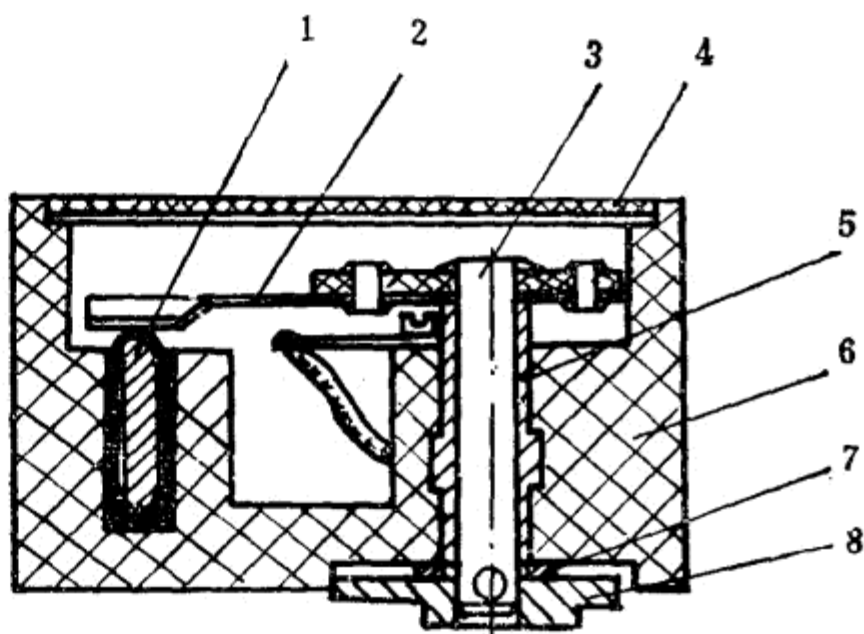


图 3.2.3 线绕电位器式角位移传感器结构图
1. 电位器 2. 电刷 3. 转轴 4. 盖 5. 衬套
6. 壳体 7. 垫圈 8. 连接件

1. 电位器

电位器是位移传感器的主要组件。对于金属骨架一般先将骨架加工成圆环，然后根据需要分成二段或三段〔图 3.2.4(a)〕。环形电位器的绕线比条形电位器要困难，不允许出现匝间不均匀或叠匝的现象。实际上因为骨架有一定的厚度，不可能达到理想的密绕。尽管对环的内表面是密绕，但在外表面有明显的间隙。因此环形电位器比条形电位器的分辨率要差〔图 3.2.4(b)〕，即不灵敏区要大些。

对非金属材料的环形电位器(如夹布胶木板、环氧玻璃纤维板等)，可以先作成条形绕线，再弯曲成形放在壳体内。这时绕组的线匝之间应留有一定间隙〔图 3.2.4(c)〕。

2. 电刷

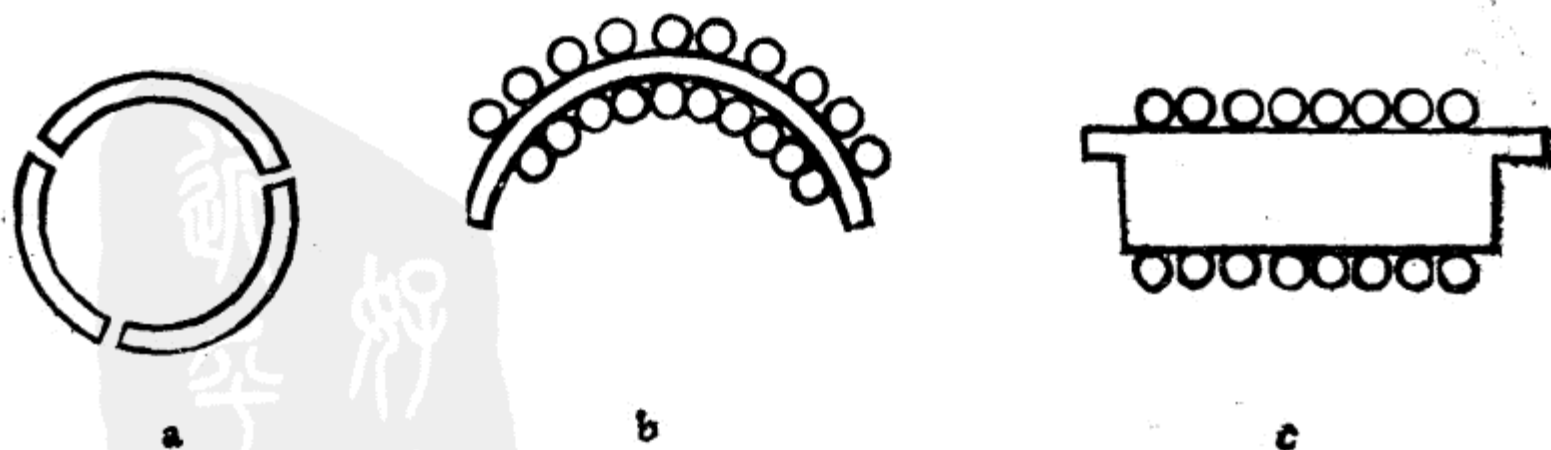


图 3.2.4 环形电位器骨架与绕组
(a) 环形骨架 (b) 环形绕组 (c) 条形骨架

对角位移传感器电刷的材料要求与电位器绕组材料匹配,且耐磨、接触可靠。为了将电刷信号输出,往往需采用输电装置,其形式如图 3.2.5 所示。

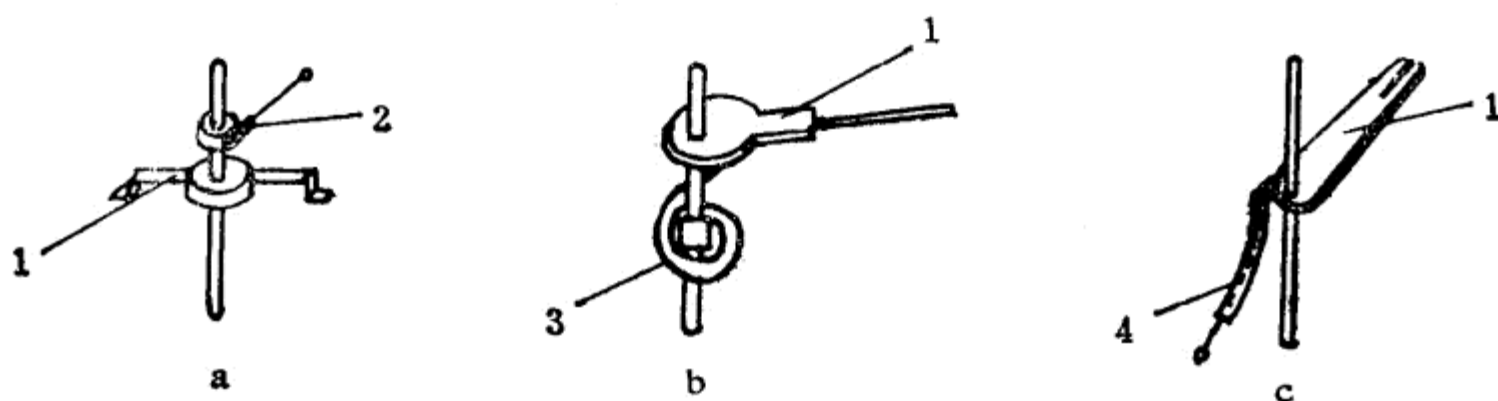


图 3.2.5 信号输出形式

a. 导电环式 b. 导电游丝式 c. 软导线式 1. 电刷 2. 导电环 3. 导电游丝 4. 软导线

3. 转轴

传感器的转轴,一端与电刷相联,另一端与被测物体相联。为了增加转动的灵活性,转轴可以用轴承或轴套支承。转轴材料要求刚度好,易于加工,尺寸精确,配合紧密,一般用不锈钢(如 1Cr13、2Cr13、2Cr13Ni2 等)材料。

为了保证电刷不滑出电位器的工作范围,在结构上应有限位装置。这在设计中是必须考虑的。

4. 壳体

传感器各组件都固定在壳体上,在很多情况下电位器用胶(如 X98 缩醛胶)胶合在壳体上。这样使结构紧凑,体积小。

主要性能 目前使用的线绕电位器式角位移传感器一般都能达到下述指标:

1. 测量范围: $\pm 10 \sim \pm 165^\circ$ ($0 \sim 330^\circ$);
2. 电位器全电阻: 几百欧姆至几千欧姆;
3. 非线性: $\pm 0.5 \sim \pm 3\%$ (占电位器全电阻);
4. 工作温度: $-50 \sim +150^\circ$ (金属骨架);
5. 工作寿命: 数万次。

线绕电位器式角位移传感器具有结构简单、体积小、测量角度范围广、输出信号大(一般不用放大器)、抗干扰性强、精度比较高等优点,被广泛用来测量各种回转体的回转角度和

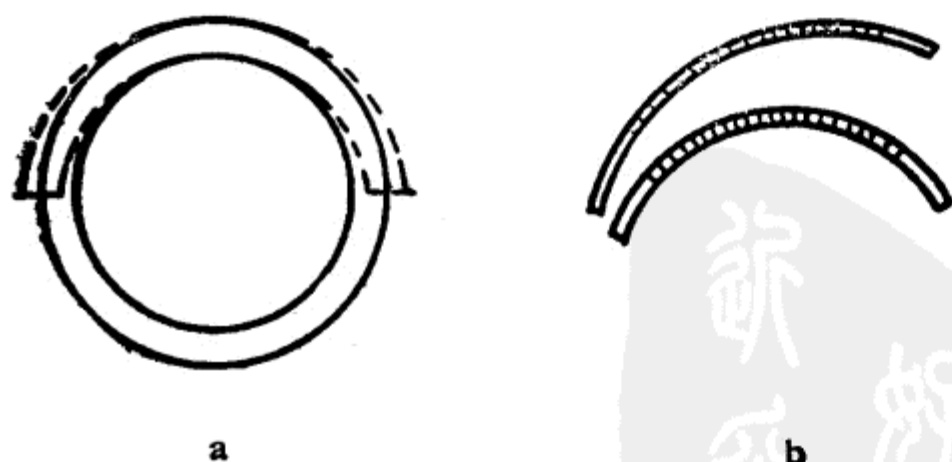


图 3.2.6 曲率误差

a. 骨架形状曲率不一致 b. 安装不同心

角位移。但它也有一些缺点。如当采用环形电位器时,由于是分段加工骨架,各段会出现曲率不一致的现象,如图 3.2.6(a)所示。这样便会造成所谓“曲率误差”。又如图 3.2.6(b)所示,当环形绕组电位器在安装时,如果转轴轴心与电位器轴心不重合,也会产生曲率误差。

此外,当转轴与衬套间间隙太小时,由于摩擦会出现“卡死”现象(特别是在转速比较高的情况下);

间隙太大,会出现类似图 3.2.6(b)的现象。

又由于电位器的分辨率有限,因此精度不可能很高。电刷和电位器的接触摩擦限制了使用寿命。

§ 3.2.2 非线绕电位器式

工作原理 非线绕电位器式角位移传感器的工作原理如图 3.2.7 所示。当转轴随被测物体转动时,电刷在电位器上移动,通过集电片将有与转角成比例的电压信号输出。

总的来讲,非线绕电位器(这里主要指接触式的,有时也称为薄膜电位器)工作原理与线绕电位器角位移传感器相同。其不同点仅在变换元件的结构、材料及制作工艺上。

结构 如图 3.2.8 所示。该传感器主要由电位器、电刷、导电片、转轴和壳体几部分构成。下面主要介绍一下电位器和电刷。

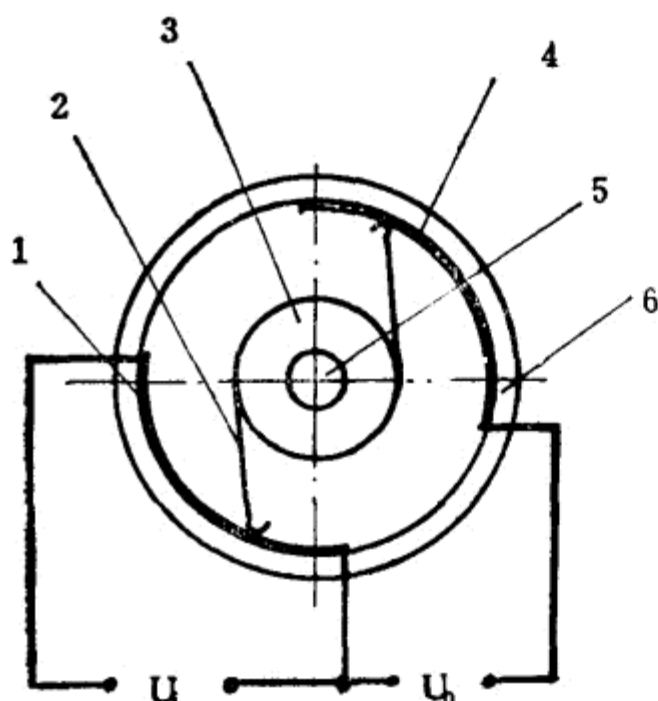


图 3.2.7 非线绕电位器式角位移传感器工作原理图

1. 电位器 2. 电刷 3. 导电环 4. 导电片 5. 转轴
6. 壳体 U_i : 电位器端电压 U_o : 输出电压

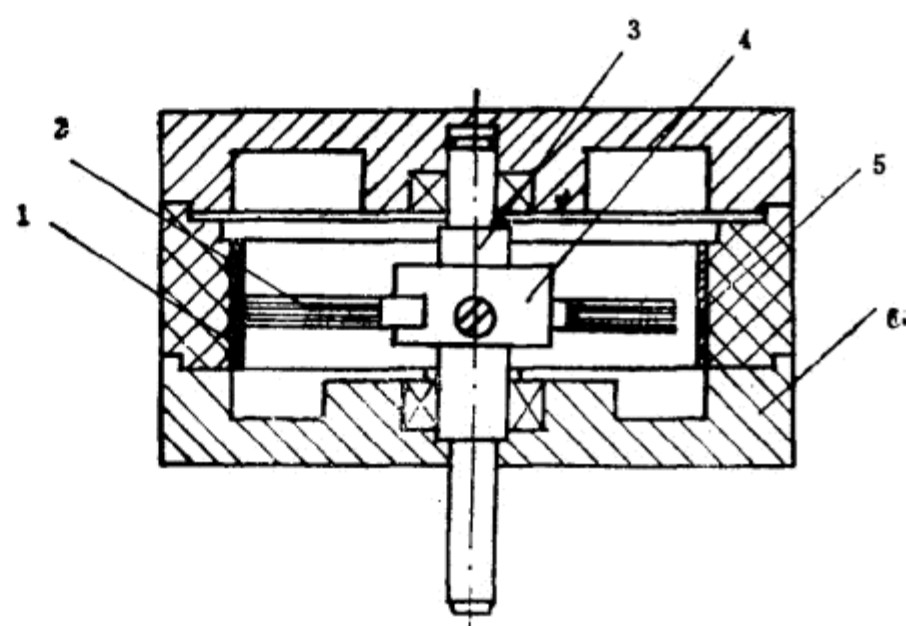


图 3.2.8 非线绕电位器式角位移传感器结构图

1. 电位器 2. 电刷 3. 转轴 4. 导电环
5. 导电片 6. 壳体

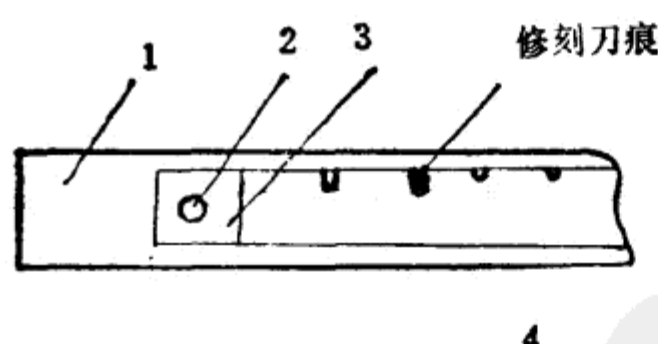


图 3.2.9 非线绕电位器结构示意图

1. 基体 2. 引线柱 3. 银泥 4. 电阻膜

1. 电位器
非线绕电位器由电阻膜和基体构成,如图3.2.9所示。它的引线用银泥(银粉和 F 37—1 烘漆的混合物)涂在电位器的两端,烘干后可与基体牢固地结合。然后按图 3.2.10 的形式将引线引出。

图 3.2.10(a)表示接线柱头部涂有焊锡,对整个组件加温使焊锡熔化后流至四周,锥形面能产生机械锁紧效果。

图 3.2.10(b)表示用铆接方法引线。

图 3.2.10(c)表示先将接线柱装入基体(超出基体高),当进行焙烧(如陶瓷基体)时,基体收缩而将接线柱紧固。然后将高出部分磨平,再将银泥涂于其上,使之同电阻膜一般高。

就电位器本身来讲,由于材料、工艺不同,在结构上有合成膜、金属膜、导电塑料和金属陶瓷等。下面将逐一介绍。

(1) 合成膜电位器

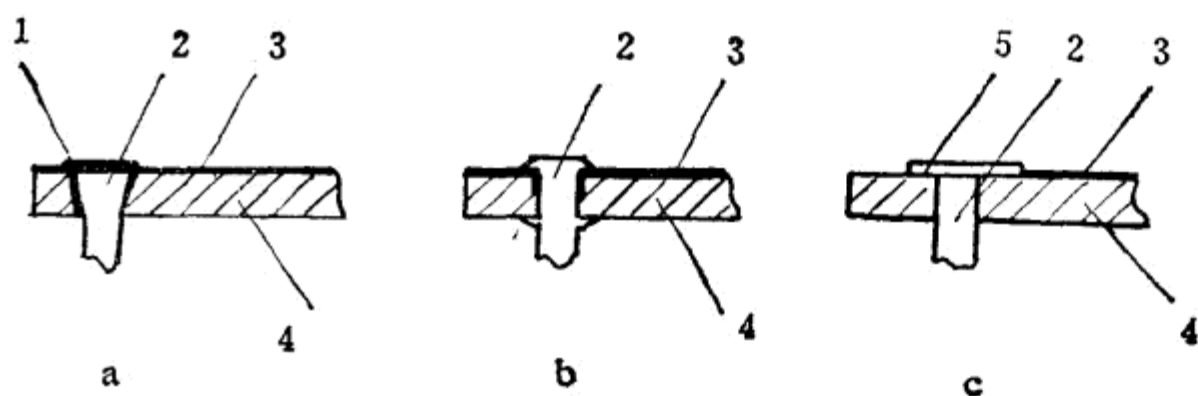


图 3.2.10 电位器引线方式

1. 焊锡 2. 引线柱 3. 电阻膜 4. 基体 5. 银泥

它是将电阻液喷涂在绝缘骨架上经烘干而成电阻膜。电阻液主要由石墨、炭黑、树脂等按比例混合而成。石墨除了具有导电性外，还能降低温度系数和有自润滑的特点。骨架

多用非金属材料，如陶瓷、聚酰亚胺、压塑料等。电阻液每喷涂一次，烘干一次。在烘干的过程中溶剂被蒸发，树脂交链形成一层耐磨的薄膜。一般喷3~5次，每次应进行中间检测，主要检查电阻值和绝缘性。采用机械化的喷涂可得到均匀的电阻膜，且产量高，成本低。

由于合成膜电位器工艺简单，成本低，因而得到广泛地应用。

(2) 金属膜电位器

它是在玻璃或陶瓷基体上用高温蒸发或电镀的方法涂一层金属膜或金属复合膜而制成。常用的金属膜有铱膜、铂铜膜、铂铱膜。使用金属复合膜的目的是为了提高阻值和耐磨性。金属复合膜有氧化锡膜、镍铬合金膜、氧化钛膜。复合膜是由一层金属膜和一层氧化膜合成的。它的温度系数和摩擦系数小，但阻值范围比较窄，耐磨性较差，承受功率小。

(3) 导电塑料电位器

这种电位器的电阻膜不是采用喷涂和蒸发，而是塑压成形。先将电阻材料如石墨、金属粉、树脂按比例混合，初步成形，再与填料（即形成电位器的底座）一起塑压成完整的电位器。因此它的结构紧密、平滑，与电刷接触时磨擦力极小，寿命极长，抗潮湿，耐盐雾，耐霉菌。目前国内生产的这种电位器阻值比较分散。

(4) 金属陶瓷电位器

它是以玻璃釉为粘结剂与导电物质（银、钯、铑、碳化钨、氧化铟等）混合后烧结在陶瓷或玻璃基体上而成。焙烧过程要严格控制湿度和温度，这样可以达到总阻值和温度系数的最佳要求。通过改变电阻液的成分、焙烧时间和温度，可以在广泛的范围内得到各种阻值。

金属陶瓷电位器具有硬而光滑的表面，它具有分辨率好和良好的化学稳定性。不论在静态或动态接触电阻变化比较小，噪声小，频率响应好，耐磨和耐高温。它是一种很有发展前途的非线绕电位器。

2. 电刷

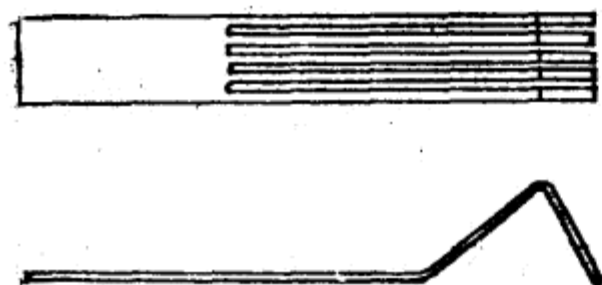


图 3.2.11 多指电刷

为了减少接触电阻，电刷的材料应有良好的弹性和导电性，并且耐磨。一般均采用多指电刷的结构形式，因为在非线绕电位器式角位移传感器中，电刷的寿命代表了产品的寿命。

电刷、导电环和导电片组成了输电装置。对导电片的要求是光洁度高(▽9)，摩擦系数小（有时在导电片表面涂一层石墨进行润滑）。它一般用黄铜带或铍青铜带制成。

图 3.2.11 为多指电刷结构。

电 路 各种非线绕电位器使用时的线路如图3.2.12所示。其中 R_w 为电刷和电位器的接触电阻。采用多指电刷时，不仅可使电阻大大减小(如 $1\ \Omega$)，而且提高了电路的可靠性、抗振性及能承受较大振的电流。

虽然构成电位器的导电材料、粘胶剂、基体材料经过一定工艺(主要是烘干、混合、球磨、过筛等)使它们变为一个整体，但由于电阻液经过球磨、过筛之后不可能完全均匀，将导致在使用中的线性度差(一般为 $2\sim 5\%$)。为了提高线性度(达 1%)，实际使用的电位器都要经过修刻。修刻是根据电桥平衡原理(见图 3.2.13)，将被刻电位器固定在刻槽机上，用光学分度头进行分度修刻。

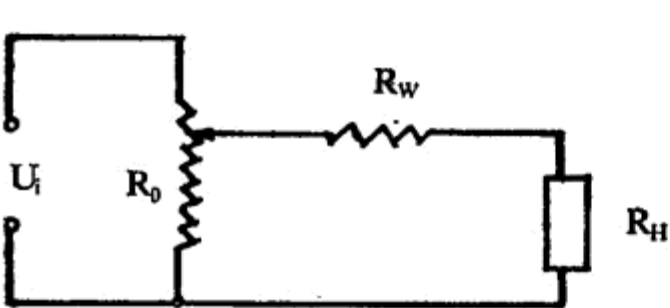


图 3.2.12 电路与电位器的接触情况

R_0 、电位器电阻 R_w 、接触电阻
 R_H 、负载电阻 U_i 、电位器端电压

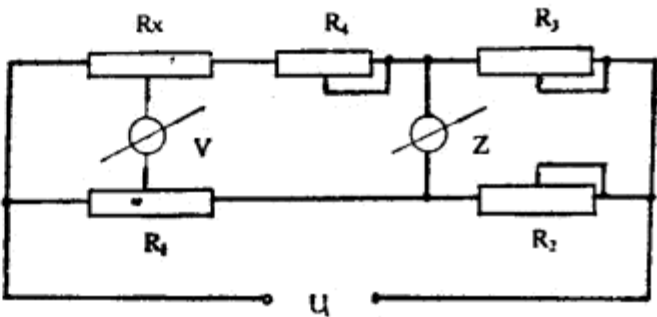


图 3.2.13 修刻电位器的原理线路图

R_x 、被测电位器 R_1 、精密电阻箱 R_2 、 R_3 、电阻箱
 R_4 、滑线电阻器 V 、数字毫伏表 Z 、检流计(指零用)

主要性能 非线绕电位器的主要性能如下：

- 1. 测量范围： $0\sim 330^\circ$ (可以对称输出)；
- 2. 分辨力： $2\sim 6''$ (理论上无限的)；
- 3. 线性误差： $\leq 5\%$ ；
- 4. 工作温度： $-40\sim +70^\circ\text{C}$ ；
- 5. 工作寿命：受限于电刷寿命(金属膜电位器寿命较低)。

常用的电位器的性能见表 3.2.1。

对于精密电位器的选用要求见表 3.2.2。

表 3.2.1 常用电位器性能对比表

特 性	线 绕	碳 质		金属陶瓷	金 属 膜	导电塑料
		模 压	沉 积			
阻 值 范 围	$10\Omega\sim 100\text{k}\Omega$	$100\ \Omega\sim 10\text{M}\Omega$	$100\ \Omega\sim 10\text{M}\Omega$	$10\ \Omega\sim 5\text{M}\Omega$	$50\ \Omega\sim 20\text{k}\Omega$	$100\ \Omega\sim 4\text{M}\Omega$
温度系数($\text{m}\Omega/\text{C}$)	± 50	± 8000	± 1000	± 100	± 50	± 200
分 辨 率	$0.1\%\sim 1$	—	—	$<0.05\%$	$<0.05\%$	$<0.05\%$
线 性 度	0.1%	—	—	0.4%	0.2%	0.05%
静 态 噪 声	甚 小	大	中	中	小	小
动 态 噪 声	大	中	中	中	小	小
旋转寿命(次) $\times 10^3$	$200\sim 1000$	5000	1000	500	100	4000
损 坏 形 式	突然损坏	噪音增大	噪音增大	噪音增大	阻值增大或突然损坏	噪音增大
高 频 性 能	差	好	好	好	优	好

表 3.2.2 精密电位器选用指南(打“√”者为选用的)

使 用 要 求	电 位 器 元 件 选 择			要求严格的应用 应考虑构造问题		
	线绕	导电塑料	线绕复合/导电塑料	电刷	外壳	轴承
电 气 方 面						
总 电 阻 值(Ω)						
25~100	√					
100~500 k	√	√	√			
500 k~1 M		√				
总电阻值允许误差(%)						
±10 ±20		√				
±10			√			
±3 ±5	√					
分 辨 率(%)						
0.009~0.09	√					
较 好		√	√			
线 性 度(%)						
最 大						
±0.5~±1.00		√				
±0.15~±0.50	√	√	√			
等效噪声电阻(Ω)						
100	√			√		
输 出 平 滑 度(%)						
0.1		√	√	√		
功率(W, 70℃下)(或最大电压作用下)						
1.0~2.0	√	√	√	√		
2.0~5.0	√					
线 路 频 率(Hz)						
DC—1 k	√	√	√			
DC—1 M		√				
温 度						
温 度 系 数(mmP/℃)						
±200		√			√	
±100			√			
±50	√					

续表

使 用 要 求	电 位 器 元 件 选 择			要求严格的应用 应考虑构造问题		
	线绕	导电塑料	线绕复合/导电塑料	电刷	外壳	轴承
电 气 方 面						
工 作 温 度(℃)					✓	
-55~125	✓	✓	✓			
-55~150	✓					
潮 湿 电 阻					✓	
极 好		✓				
好	✓		✓			
机 械 方 面						
旋转寿命, 轴转数						✓
2000×10 ³	✓					
10000×10 ³			✓			
25000×10 ³		✓				

总之，非线绕电位器式角位移传感器的分辨率高，耐磨性好，阻值范围宽。但它们的接触电阻和噪声比较大。为此必须加大电刷的接触压力。然而这会给被测量体带来附加力矩，这在某些使用场合是不允许的。

非线绕电位器(特别是导电塑料和金属陶瓷电位器)近十多年来在国外发展迅速，工艺问题得到解决。有人甚至预言会出现由非线绕电位器取代线绕电位器的可能。现在又出现一种复合电阻元件，它是将线绕元件和导电塑料涂层结合起来，而获得它们的长处。如具有线绕电阻元件的温度系数和阻值稳定性，具有导电塑料电阻元件长的工作寿命、高分辨率和低噪声。但接触电阻比较大(与导电塑料电位器相似)。

§ 3.2.3 光电电位器式

工作原理 如图 3.2.14 所示。光电电位器是由薄膜电阻带、光电导层和集电极组成。先将基体上沉积一层硫化镉(CdS)或硒化镉(CdSe)的光电导体，后在其上沉积一条薄膜电阻带。集电极为一条高传感的导电层，它与电阻带平行。在电阻带与集电极之间留有很窄的缝隙，作为电刷(称为光电刷)的光束可照射在该窄缝上。由于光导材料的暗电阻(无光照射时的电阻)与光电阻(有光照射时的电阻)之比可达 $10^5\sim10^8$ ，所以，当窄缝上有光照射时，可看成集电极和电阻带导通，输出端有电压输出；无光照射时，集电极与电阻带之间的窄缝可看成断路。

因此，我们将光电刷固定在被测角度的转轴上。当它随着转轴在窄缝上移动时(当然是无接触

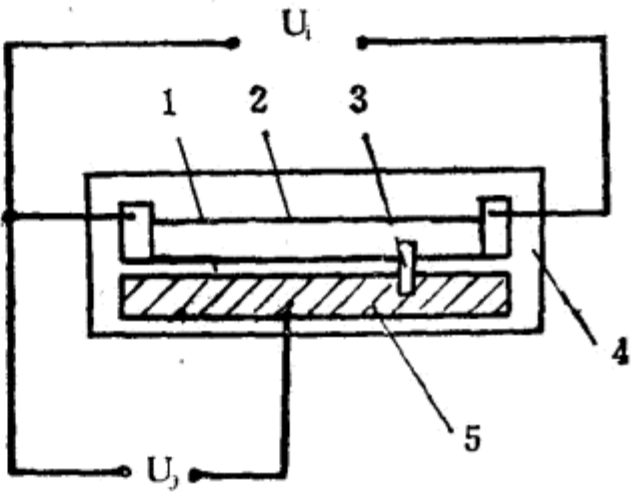


图 3.2.14 光电电位器工作原理图
1. 光电导体 2. 电阻带 3. 光电刷 4. 基体
5. 集电极 U_i 电位器端电压 U_o 输出电压

的),在输出端就有一个与转角成比例的电压信号输出。这就是光电电位器式传感器的工作原理。

结 构 如图 3.2.15 所示。光电电位器式角度传感器主要由光电电位器、光电刷、转轴、壳体等组成。

下面主要介绍光电电位器、光电刷和转轴。

1. 光电电位器

它是传感器的主要变换元件,结构见图 3.2.16。

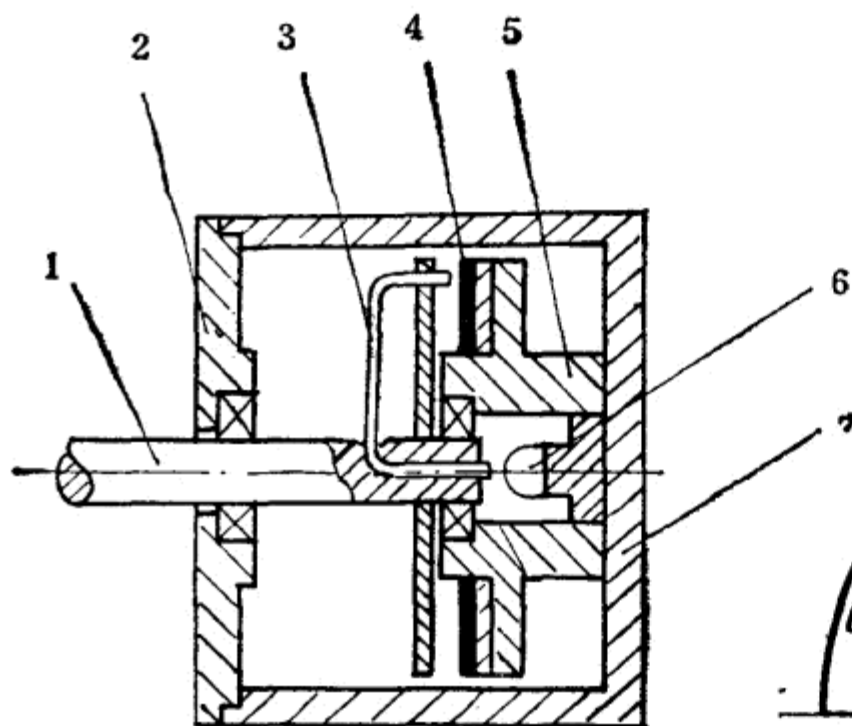


图 3.2.15 光电电位器式角度传感器结构示意图

1. 转轴 2. 盖 3. 光导纤维束 4. 光电电位器
5. 支座 6. 光源 7. 壳体

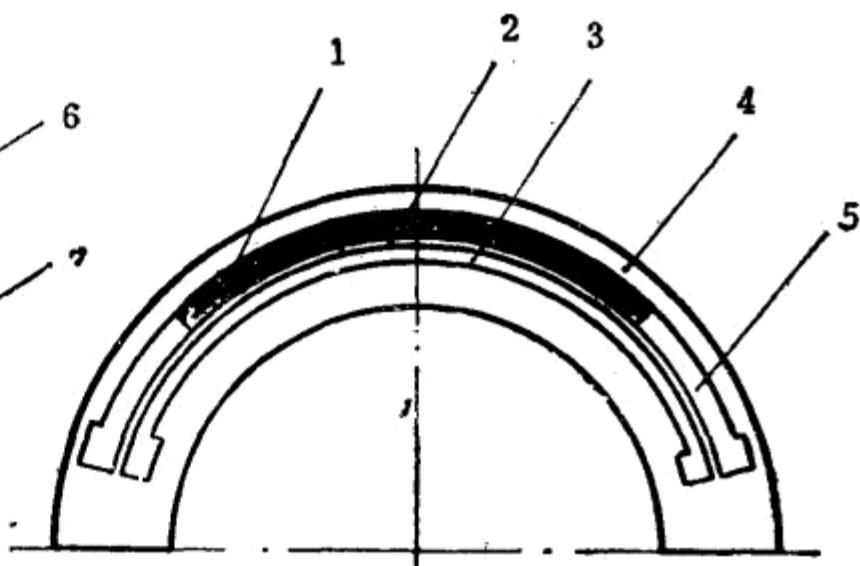


图 3.2.16 光电电位器结构示意图

1. 电阻带 2. 光电导体 3. 集电极
4. 基体 5. 短路带

电位器的基体采用陶瓷或玻璃制成;

光电导层为掺杂的光电导体(如 CdS 、 CdSe);

电阻带为 Cr-SiO_2 ;

集电极为镀膜黄金。

最外面要加一层密封保护层,可沉积 SiO_2 或涂环氧树脂(要求它既密封,又透光,还要和基体、光电材料、电阻材料共熔)。因此光电电位器的工艺流程为:

基体→沉积光敏层→敏化→沉积电阻带→沉积集电极→热处理→焊引线→涂保护层。

沉积后的光敏层不具有光敏性,因此必须进行敏化处理,达到光敏效果。

有效的热处理能使电阻带性能稳定,灵敏度提高。

2. 光电刷

它主要指的光导纤维束。它的聚光性强、传光效率高,且柔软,安装方便,使用可靠。

光导纤维束的两端与光源、电位器的间隙要尽量小,以避免光的散射。

光源可采用钨丝灯,要求它效率高,寿命长。

3. 转轴

光电刷固定在转轴上。在测量快速转角时,转轴采用高精度的滚珠轴承支承;在测量慢转角时,可用宝石轴承支承。

电 路 由于光电导体并非完全导体,因此光电刷的接触电阻很大($10\sim 50\text{k}\Omega$)。如图