

§ 2.12 电容式测孔传感器

电容式测厚传感器已在 § 2.4 中作了介绍, 本节专门介绍电容式测孔传感器。

§ 2.12.1 环形测孔传感器

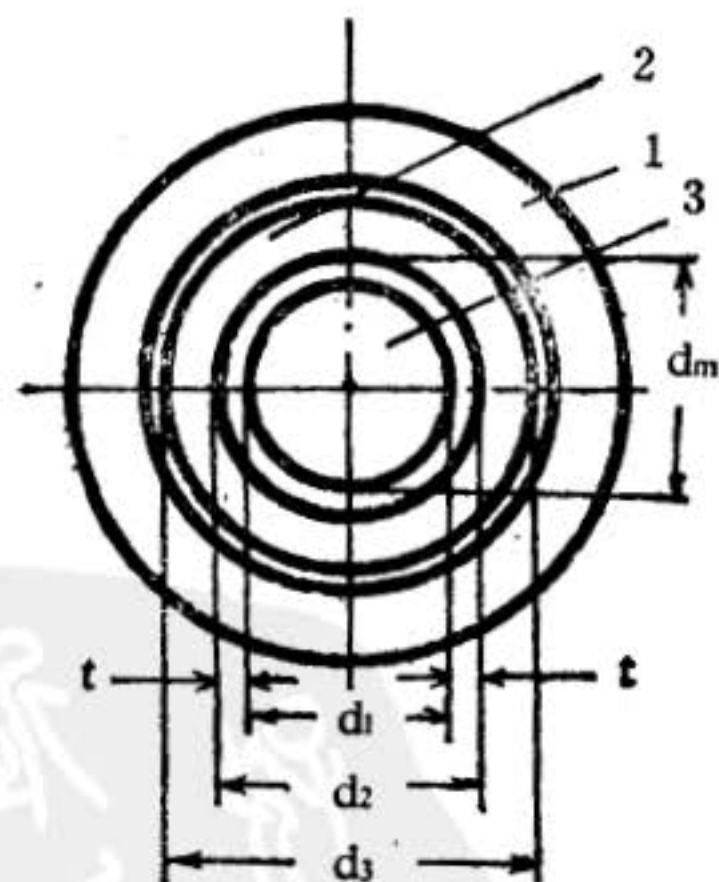


图 2.12.1 环形测孔传感器结构示意图

1. 保护层; 2. 内屏蔽环; 3. 内电极

所谓环形测孔传感器, 即测孔用的电极为一个圆环状, 如图 2.12.1 所示。

工作原理 在图 2.12.1 中, d_1 为内电极直径 (3mm); d_2 为内屏蔽环内径 (3.2mm); d_3 为内屏蔽环外径 (3.8~6mm); d_m 为节圆直径 (3.1mm); t 为内电极与内屏蔽环间绝缘层厚度 (0.1mm)。

它们之间有如下关系:

$$d_2 = d_1 + 2t \quad (2.12-1)$$

$$d_m = \frac{1}{2}(d_1 + d_2) \quad (2.12-2)$$

$$(d_2 + 3h) \leq 2d_1 \quad (2.12-3)$$

环形传感器测孔如图 2.12.2 所示。图中, 传感器 1 和被测工件 7 间的电容为

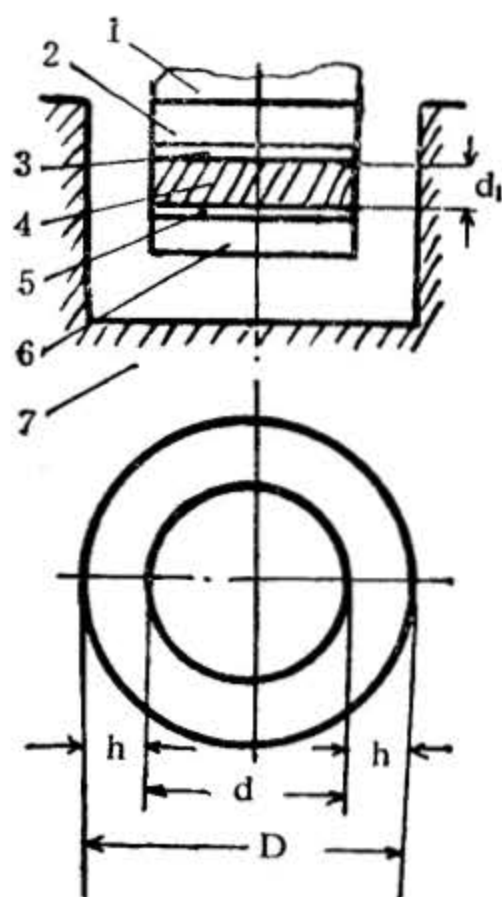


图 2.12.2 环形测孔传感器测孔图

1. 传感器 2. 保护环 3. 绝缘层 4. 内电极
5. 被测工件 6. 保护环 7. 被测工件

将式(2.12-6)代入式(2.12-5)中，并忽略高次项(因 $d \gg 2h$)，则有

$$\ln \frac{D}{d} \approx \frac{2h}{d} \quad (2.12-7)$$

将式(2.12-7)代入式(2.12-4)中，并令 $\epsilon_r = 1$ (空气中测时)，则有

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 d_1}{2h/d} = \frac{\epsilon \cdot S}{(D-d)/2} \quad (2.12-8)$$

式中 S —传感器内电极的面积， $S = \pi d_1 d$ 。

由式(2.12-8)可知，当 S 、 d 、 ϵ 、 C 已知后，则被测工件孔的直径 D 便可知。

电 路 测量时，可将环形电容传感器接成如图 2.12.3 所示的比例运算电路。根据该电路，输出电压 V_o 大小为

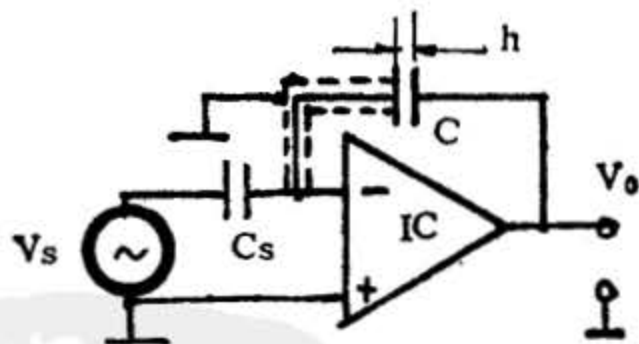


图 2.12.3 环形电容传感器的测量电路图

上式说明，输出电压 V_o 的大小与 $(D-d)$ (被测工件与传感器的间隙)成正比。

主要性能 环形测孔传感器主要性能如下：

最大测孔范围(即 h)为 $200\mu\text{m}$ ；

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r d_1}{\ln \frac{D}{d}} \quad (2.12-4)$$

式中 ϵ_0 —真空中介电常数， $\epsilon_0 = 8.85415 \times 10^{-12} \text{f/m}$ ；

ϵ_r —传感器和被测工件间的相对介电常数，若为空气，则 $\epsilon_r = 1$ ；

d_1 —传感器内电极环厚度；

d —传感器内电极直径；

D —被测孔直径。

将式(2.12-4)中 $\ln D/d$ 用幂级数展开，则有

$$\ln \frac{D}{d} = \left(\frac{D}{d} - 1\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{D}{d} - 1\right)^2 - \frac{1}{3}\left(\frac{D}{d} - 1\right)^3 - \dots \quad (2.12-5)$$

由于 $D-d=h$ ，因而

$$\frac{D}{d} - 1 = \frac{D-d}{d} = \frac{2h}{d} \quad (2.12-6)$$

$$V_o = -\frac{C_s}{C} V_s \quad (2.12-9)$$

式中 C_s —标准固定电容(1pf)；

V_s —信号源电压，频率为 10kHz，幅值稳定性为 0.01%，幅值可调；

C —环形电容器的电容。

将式(2.12-8)代入(2.12-9)式可得

$$V_o = \frac{C_s V_s}{2\epsilon_0 S} (D-d) \quad (2.12-10)$$

灵敏限 $0.01\mu\text{m}$ ($\phi 3\text{mm}$ 传感器), $\phi 1\text{mm}$ 的灵敏度限为 $0.001\mu\text{m}$ 。

环形电容传感器可测精密设备的微小孔径。它的优点是线性度好,性能稳定,结构简单,精度高。

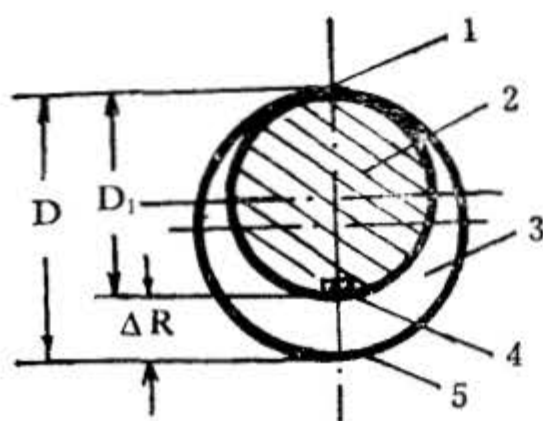


图 2.12.4 单向测孔传感器

1. 定位点 2. 芯轴 3. 被测孔 4. 电极 5. 被测工件

§ 2.12.2 单向、双向测孔传感器

1. 单向测孔传感器

工作原理 单向测孔传感器如图 2.12.4 所示, 被测工件内孔与传感器芯轴形成一个复杂的形状。从顶部截面看, 它们间的空隙为一个月牙状。实际上则为图 2.12.5 所示的复杂形状。由于传感器的芯轴单向靠于被测工件一边, 故称为单向测孔传感器。

单向测孔传感器的电容(在斜靠时)可由

下式表示:

$$C = \frac{\epsilon_0 2\pi l}{\ln \frac{R}{R_1}} \cdot k \quad (2.12-11)$$

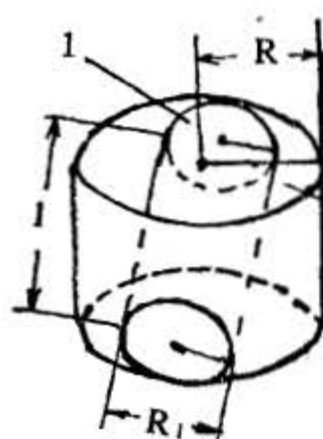


图 2.12.5 单向测孔传感器实体形状

1. 芯轴; 2. 被测工件内孔。

式中 R —被测孔的半径;
 R_1 —芯轴半径;
 l —芯轴斜靠时的棱长;

k 可由下式给出

$$k = \frac{S}{S_0} \quad (2.12-12)$$

式中 S —传感器电极面积(在 $l = \phi$ 时, ϕ 为芯轴直径)

S_0 —半径为 R_1 、高为 ϕ 的圆柱面面积, 即

$$S_0 = 2\pi R_1 \phi \quad (2.12-13)$$

为了计算 s 大小, 可将芯轴绘于图 2.12.6 中。由图可知

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}}{\sqrt{x^2 + \left[\sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}\right]^2}}$$

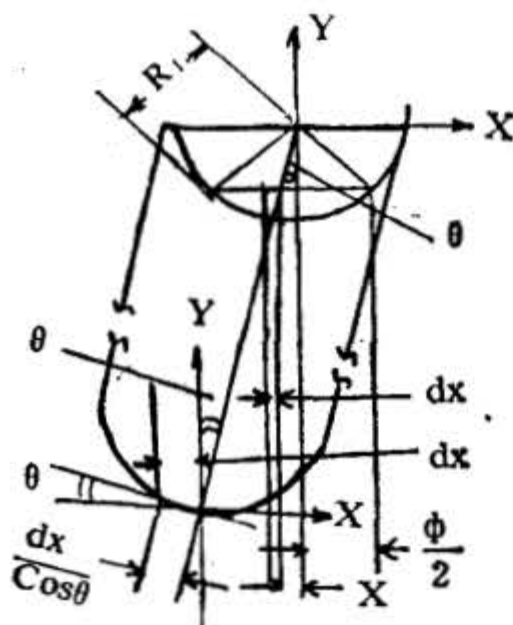


图 2.12.6 计算参数时用的芯轴图

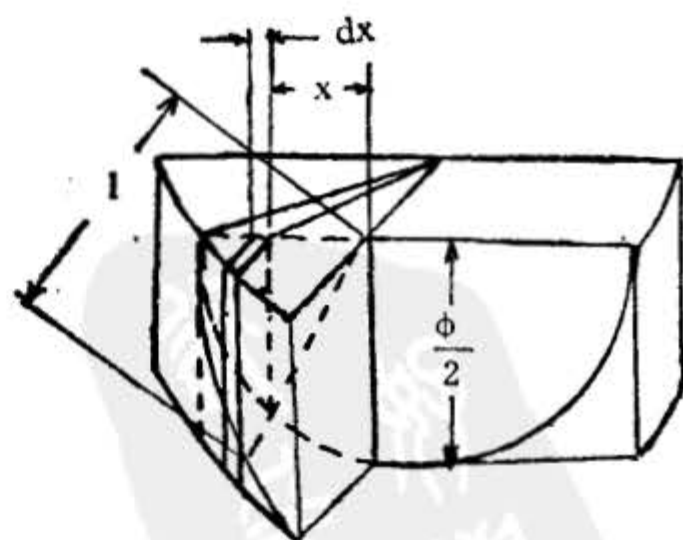


图 2.12.7 计算参数时用的被测工件孔的图

$$= \frac{\sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}}{\sqrt{x^2 + R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}} \quad (2.12-14)$$

而被测工件孔的图绘于图 2.12.7 中。由图中可知

$$l = \sqrt{\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - x^2} \quad (2.12-15)$$

传感器的电极面积的四分之一为

$$\frac{s}{4} = \int_0^{\frac{\phi}{2}} l \frac{dx}{\cos \theta} \quad (2.12-16)$$

将式 (2.12-14)、(2.12-15) 代入式 (2.12-16) 中, 则有

$$\frac{s}{4} = \frac{1}{\sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}} \int_0^{\frac{\phi}{2}} \left[\sqrt{\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - x^2} \sqrt{x^2 + R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2} \right] dx$$

即

$$s = \frac{4}{\sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}} \int_0^{\frac{\phi}{2}} \sqrt{\left[\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - x^2\right] \left[x^2 + R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2\right]} \cdot dx \quad (2.12-17)$$

将式 (2.12-13)、(2.12-17) 代入式 (2.12-12) 中, 则有

$$k = \frac{2 \int_0^{\frac{\phi}{2}} \sqrt{\left[\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - x^2\right] \left[x^2 + R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2\right]} \cdot dx}{\pi R_1 \phi \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}} \quad (2.12-18)$$

将式 (2.12-18) 代入式 (2.12-11) 中, 则有

$$C = \frac{4\epsilon_0 l \int_0^{\frac{\phi}{2}} \sqrt{\left[\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - x^2\right] \left[x^2 + R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2\right]} \cdot dx}{R_1 \phi \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}} \quad (2.12-19)$$

由于实际上取 $l = \phi$, 而且

$$\ln \frac{R}{R_1} = \ln \frac{R_1 + \Delta R}{R_1} = \ln \left(1 + \frac{\Delta R}{R_1}\right)$$

当 $\Delta R \ll R_1$ 时, 则 $\ln \frac{R}{R_1} \approx \frac{\Delta R}{R_1}$, 将条件 $l = \phi$ 及 $\ln \frac{R}{R_1} \approx \frac{\Delta R}{R_1}$ 代入式 (2.12-9) 中, 则有

$$C = \frac{4\epsilon_0}{\Delta R \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}} \int_0^{\frac{\phi}{2}} \sqrt{\left[\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - x^2\right] \left[x^2 + R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2\right]} \cdot dx \quad (2.12-20)$$

单向测孔传感器测量电路仍然用图 2.12.3 所示的测量电路。这时, 输出电压为

$$V_o = - \frac{C_s V_s \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}}{4\epsilon_0 \int_0^{\frac{\phi}{2}} \sqrt{\left[\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - x^2\right] \left[x^2 + R_1^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2\right]} \cdot dx} \cdot \Delta R \quad (2.12-21)$$

上式说明, V_o 与 ΔR (被测孔直径与芯轴直径间最大间隙, 见图 2.12.4) 成正比。若测得 V_o , 便可知 ΔR , 从而可知被测孔直径 D 的大小。

主要性能 当 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-3} \text{p/mm}$, $R_1 = 5 \text{mm}$, $\phi_1 = 3 \text{mm}$ (即传感器直径), $C_s = 1 \text{PF}$ (标准固定电容), $V_s = 6.8 \text{V}$ (信号源电压) 时, 整机灵敏度为

$$\frac{\Delta R}{V_0} = \frac{0.01 \mu}{\text{mV}} \quad (2.12-22)$$

单向测孔时, 最大的缺点就是定位点对测量结果影响较大。如图2.12.8所示, 当被测工件重心不在被测孔的中心线上时, 则得到的 ΔR 并不对应于孔直径的数值, 而是对应于孔直径附近弦长的数值。这就给测量带来误差。

2. 双向测孔传感器

工作原理 为了克服单向测孔传感器的接触点定位的缺点, 可采用由两个传感器构成的双向测孔传感器, 如图2.12.9所示。

先将传感器调到 x 轴线上, 再移动 y 的工作面, 使 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R$, 则被测孔径

$$D = D_1 + 2\Delta R \quad (2.12-23)$$

式中 D_1 —芯轴直径。

主要性能同单向测孔。

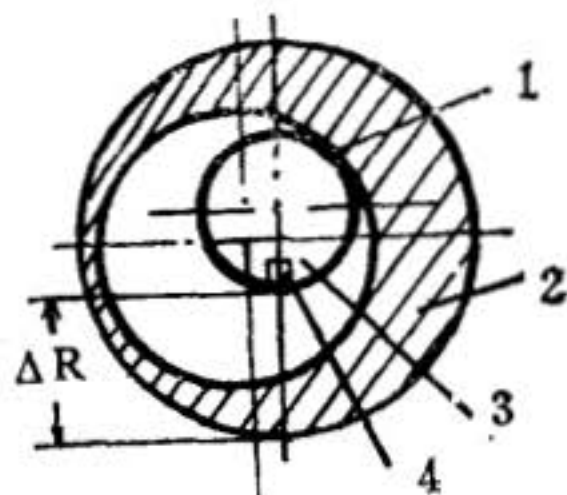


图 2.12.8 定位点对测量结果的影响

1. 定位点 2. 被测工件 3. 芯轴 4. 电极

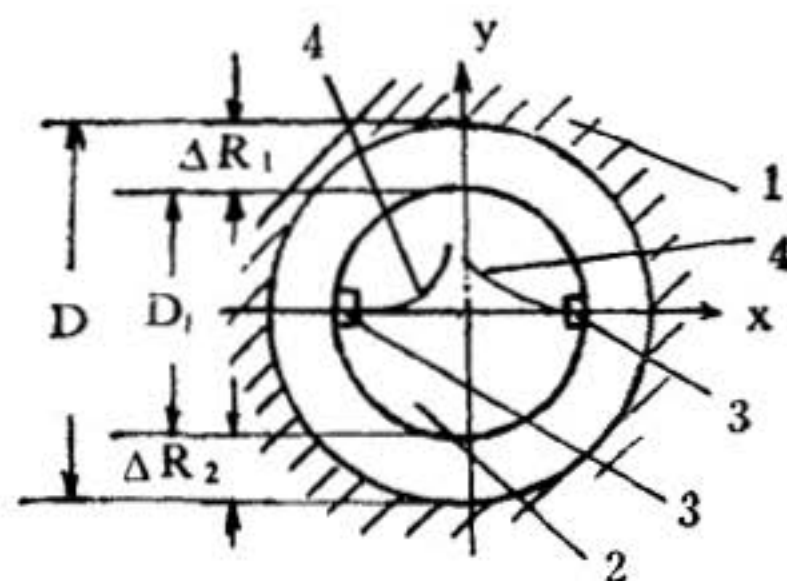


图 2.12.9 双向测孔

1. 被测工件 2. 芯轴 3. 电极 4. 电极引线