



第六章

湿度传感器

湿度传感器

6.1 概 述

6.2 电阻式湿度传感器

6.3 电容式湿度传感器

6.4 其它类型湿度传感器

6.5 湿度传感器的应用实例

6.1.1 湿度表示法

6.1.2 湿度传感器的分类

一、绝对湿度和相对湿度

空气的绝对湿度 (ρ_v) ——单位体积内空气里所含水蒸气的质量。

如待测空气是由水蒸气和干燥空气组成的理想混合气体，得出：

$$\rho_v = e M/RT$$

e 为一定温度下空气中水蒸气的分压，
 M 为水蒸气的摩尔质量， R 为理想气体常数

饱和蒸气压 (e_s) ——指一定温度下混合气体中所含水蒸气压的最大值
温度越高，饱和水蒸气压越大。

相对湿度 (Relative Humidity) ——指某一温度下水蒸气压同饱和蒸气压的百分比，为：

$$RH = e/e_s \times 100\%$$

一般用 %RH 表示

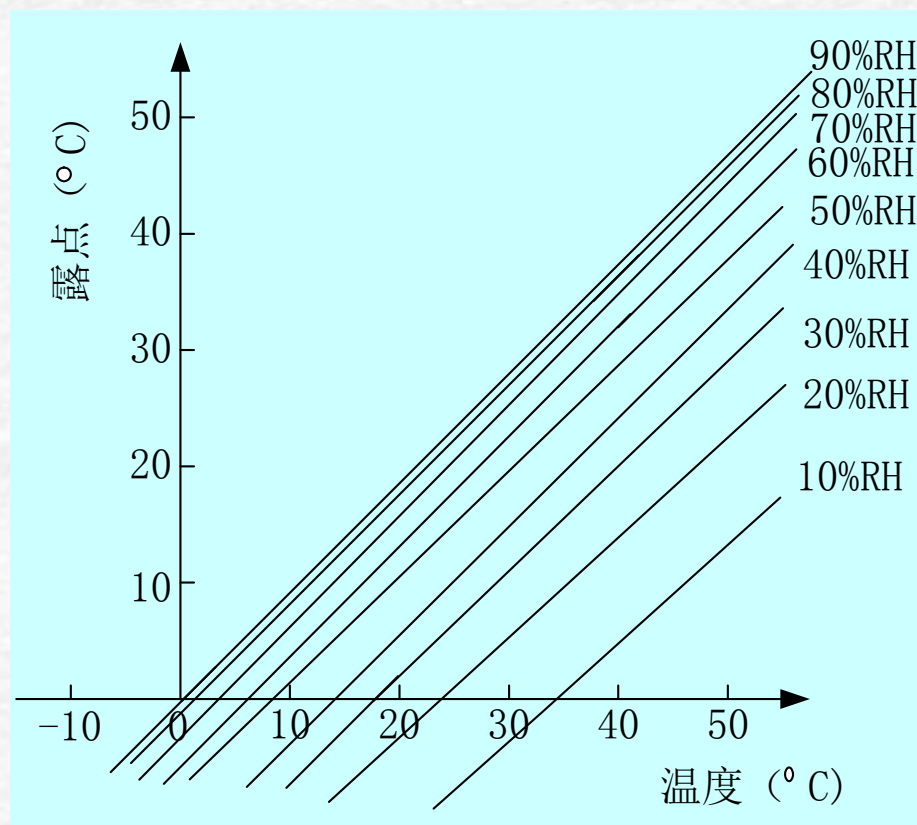
二、露（霜）点

-----随环境温度降低，水的 e_s 逐渐下降，其 e 与同温度下的 e_s 差值就越小。当下降到某一温度时， $e = e_s$ 相等，空气中的水蒸气将向液相转化而凝结为露珠，这一特定的温度被称为空气的露点温度。

其相对湿度为100%RH，
——如这一特定温度低于 0°C ，水蒸气将会结霜，可称为霜点温度，统称为露点。

空气中水蒸气压越小，露点越低，可用露点表示空气湿度的大小。露点与相对湿度有对应关系如图：

温度-相对湿度-露点的对应关系



6.1.1 湿度表示法

6.1.2 湿度传感器的分类

一、电阻式湿度传感器

——利用电导率与湿度的关系制成。

材料种类：

1. 多孔陶瓷材料的种类最多，有： $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ 系、

$\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$ 系、 $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$ 系、 TiO_2 系、 $\text{MgCr}_x\text{O}_4\text{-TiO}_2$ 系、 SrTiO_3 系、 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$ 系、 $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 系等。

2. 高分子电阻型的主要材料：高分子固体电解质材料，

如高氯酸锂-聚氯乙烯、Nafion膜、双二甲胺基甲基乙炔基硅烷和溴甲烷的季铵化物共聚物、四乙基硅烷的等离子共聚膜等等。

优点：具有感湿灵敏度高、线性度好、响应时间短、工艺简单、成本低等。

二、电容式湿度传感器

——利用电极间介质吸附水蒸气时电容量发生变化制成

按照极间介质分为：有机高分子和陶瓷材料两大类。

1. 有机高分子电容式：醋酸纤维素及衍生物为介质，目前醋酸丁酸纤维素、聚酰亚胺、硅树脂为介质。

2. 陶瓷电容式：用玻璃和陶瓷如 BaTiO_3 - BaSnO_2 P型半导体多孔陶瓷材料作介质，

通过控制陶瓷组分的分散性、孔径、粒度等，改善了组件的敏感特性。

三、其它类型湿度传感器

新型湿度传感器有：

1. 透光量随湿度而改变的光纤湿度传感器、
2. 在 H_2O-N_2 气氛下稳定化 ZrO_2 限界电流型湿度传感器
3. 浓差电池式、
4. 二极管型、
5. 石英振子式、
6. SAW式、
7. 微波式、
8. 热导式等。

湿度传感器

6.1 概 述

6.2 电阻式湿度传感器

6.3 电容式湿度传感器

6.4 其它类型湿度传感器

6.5 湿度传感器的应用实例

6.2.1 陶瓷电阻式湿度传感器

6.2.2 热敏电阻绝对湿度传感器

6.2.3 高分子电阻式湿度传感器

一、TiO₂—SnO₂系复合氧化物半导体陶瓷湿度传感器

多为厚膜组件

制备方法: TiO₂可采用Ti的热氟化法或TiCl₄还原性制作，**由于非化学量而存在氧缺陷（表示TiO_{2-x}）**。将TiO₂、SnO₂按一定摩尔比配料，掺入适量的Ta₂O₅或Sb₂O₅、V₂O₅等，经研磨细化、加水悬浮、过滤使氧化物颗粒逐渐沉淀到绝缘陶瓷衬底上，烘干后加热至950~1200℃在缺氧气氛中烧结。

制作的**TiO₂湿敏材料为金红石结构的n型半导体多孔陶瓷**，随着Ta₂O₅、Sb₂O₅的增加电阻下降，调整TiO₂、SnO₂的配比和杂质的量来控制湿阻特性。组件中毒后可加热清洗来恢复。

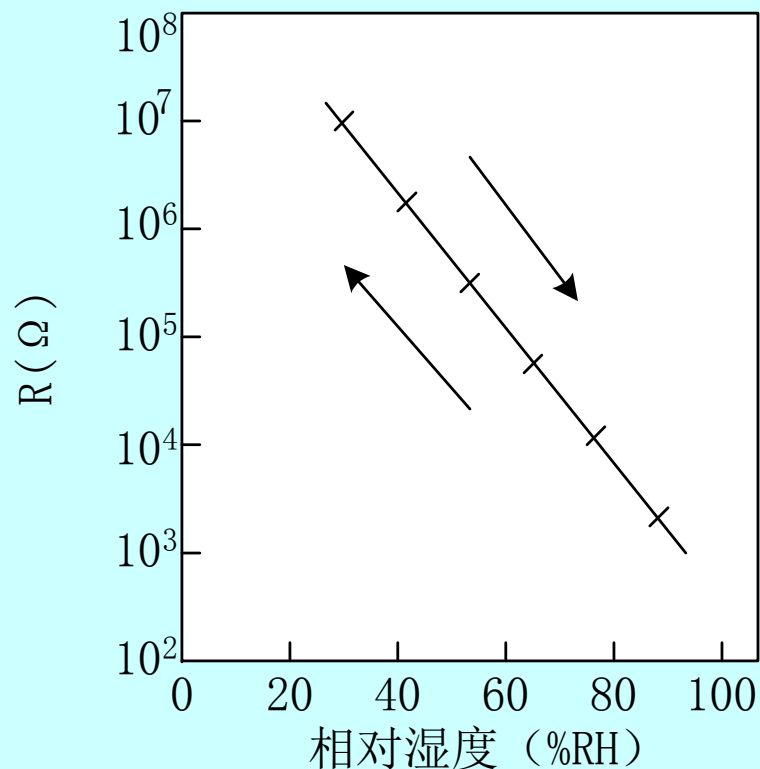
特点: 具有气敏性能，可制成多功能传感器。

具有灵敏度高、响应快、稳定性好、工艺过程容易实现等。

二、TiO₂系陶瓷湿敏元件

水分子吸附在n型TiO₂表面会引起表面空间电荷区内空穴浓度增加，电阻率下降，随湿度增加而显著下降。

TiO₂湿敏元件的湿滞特性如图，显然，湿滞现象可忽略不计，响应速度快。



TiO₂湿敏组件的湿滞曲线及湿敏特性

三、 $\text{TiO}_2\text{—V}_2\text{O}_5$ 湿敏元件

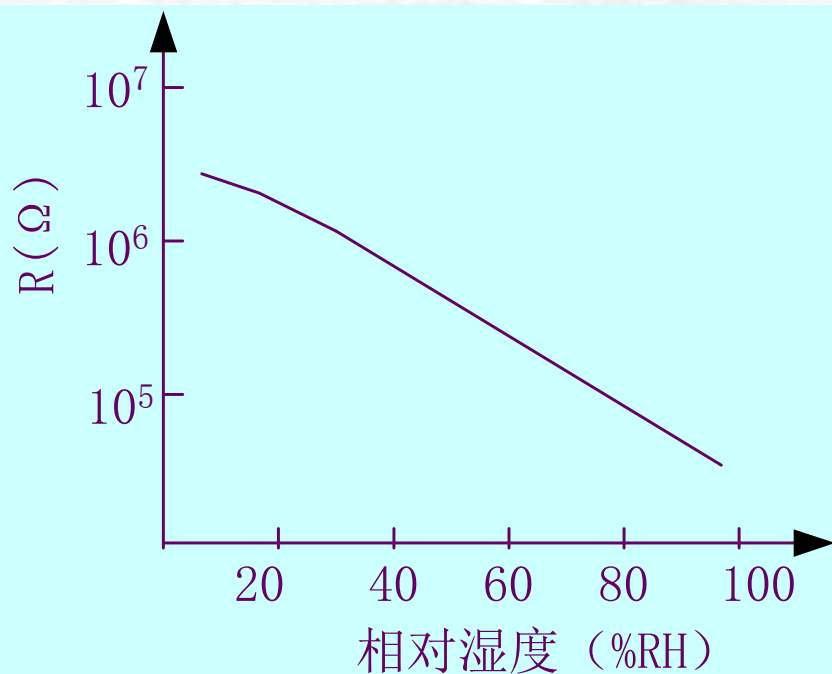
工艺：用典型陶瓷工艺在 $1000\sim 1350^\circ\text{C}$ 烧结后自然冷却，用 RuO_2 或 Ag 制作电极。

其中 V_2O_5 添加剂使材料半导化， V^{5+} 取代 Ti^{4+} 改变微孔参数和形状使电导增大。

湿度特性：测试的湿度环境用过饱和盐溶液在 $11\%\sim 98\%\text{RH}$ 间进行。如图。

为避免**直流极化**的影响，采用交流法测量，电压为 8V ，频率为 150Hz 。

优点：具有成本低、湿度量程宽、灵敏度高、响应时间短、耐热性能好等，



$\text{TiO}_2\text{—V}_2\text{O}_5$ 组件的阻-湿曲线

四、BaTiO₃—SrTiO₃系多功能陶瓷材料湿度—温度传感器

多功能传感器——能检测两种或以上物理或化学参量且互不干扰的。

原理：利用BaTiO₃—SrTiO₃多孔陶瓷的 ρ 随周围湿度变化、 ϵ 随环境T变化来制备湿度—温度传感器，

测量速度快、灵敏度高。

五、MgCr₂O₄—TiO₂系湿敏元件

MgCr₂O₄陶瓷特点：抗腐蚀性好、多孔质结构，响应快、湿滞小，且能通过加热清洗附着的油污或在低温下不可逆的水化物反应，是一种较优良的**湿敏材料**。

工艺：MgCr₂O₄、TiO₂按适当的配比经陶瓷工艺1250~1300℃烧结成半导体陶瓷，涂敷金浆后将镍引线用掺金的玻璃粉粘住，850℃下烧结成敏感芯，配上加热器即可。

使用时，加热清洗半分钟至1分钟（350-450℃下）。

感湿特性:

国产SM-1型和日本的松下II型
 $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{—TiO}_2$ 湿度传感器的感湿
特性为线性的如图。

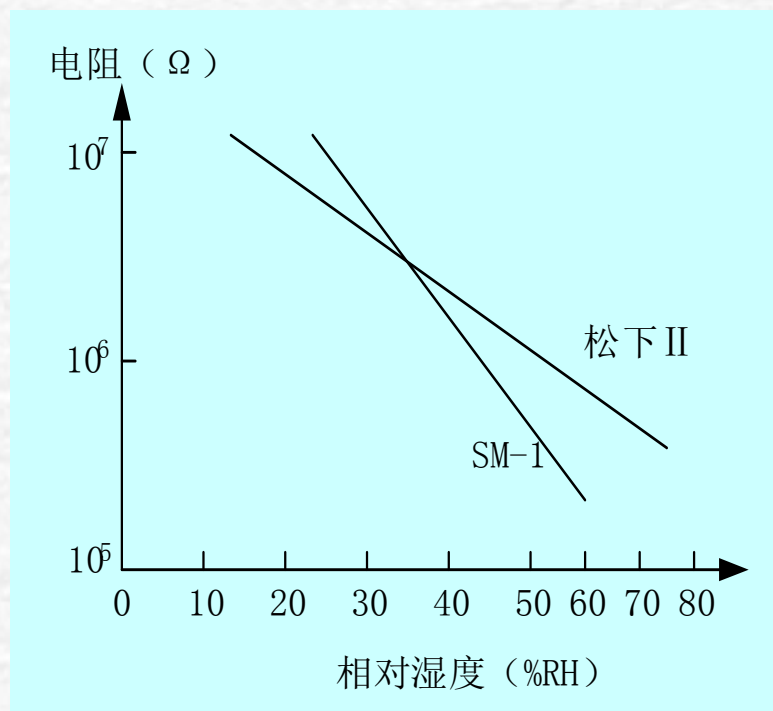
相对湿度从1%RH~100%RH的范围
内，电阻为 $10^4\sim 10^8\ \Omega$ 。

而 $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{—TiO}_2$ 半导体陶瓷的电阻率随
T的升高而指数下降，即：

$$\rho = \rho_0 e^{B/T}$$

ρ_0 为起始电阻率，B是与材料有关的常
数。

实验表明， MgCr_2O_4 和 TiO_2 的摩尔百分比为50%时， α_T 最小。



六、SrTiO₃电子型湿度传感器

——用钙钛矿型氧化物（ABO₃）研制的。用A位碱土金属**锶**离子较强的亲水性的湿敏材料如SrTiO₃，高温（300℃）下有一定的湿敏性能；

对SrTiO₃非替代的钙钛矿型氧化物，虽对湿度有敏感性，但其电阻率太大，没有多少实际使用价值。

七、陶瓷湿度传感器的应用

由于湿敏电阻随温度**T**变化，具有负温度系数，关系为：

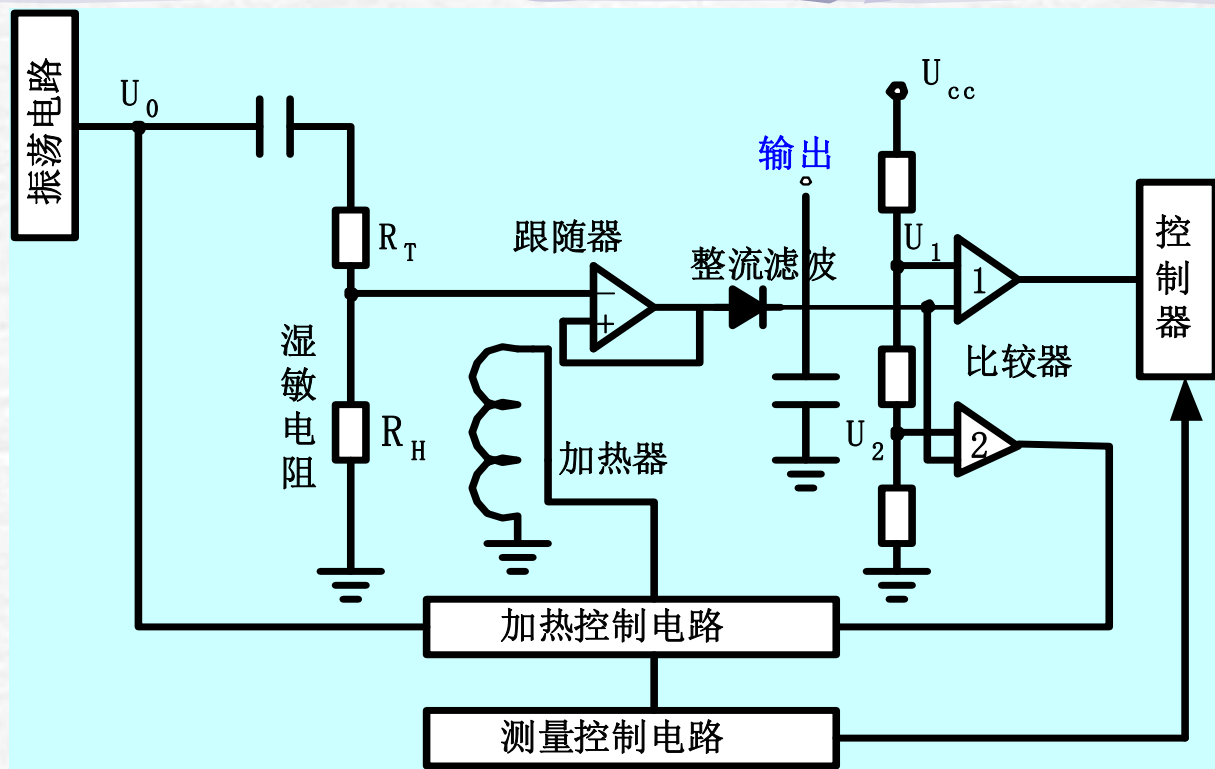
$$R = R_{T_0} e^{B/T - B/T_1}$$

R_{T_0} 为 T_0 时电阻值，B为常数

为消除温度影响，与同温度系数的 R_T 串联，取出分压。因**直流供电**利于提高精度便于数字化，

但存在静电容影响，使传感器特性不佳；应考虑**交流或脉冲电源供电**。

测量控制电路图



为使检测湿度的灵敏度最大应使 $R_T=R_H$ ，其电压经跟随器、整流、滤波再与比较器1的参考 U_1 比较以控制某一湿度。与比较器2的参考 U_2 比较控制加热电路，以便按一定时间加热清洗。

若要全湿度检测，应使 R_T 和 R_H 的连接位置互换，且 $R \gg R_T$ ，此时信号电压 U 经过对数放大器后输出与湿度成线性关系。

6.2.1 陶瓷电阻式湿度传感器

6.2.2 热敏电阻绝对湿度传感器

6.2.3 高分子电阻式湿度传感器

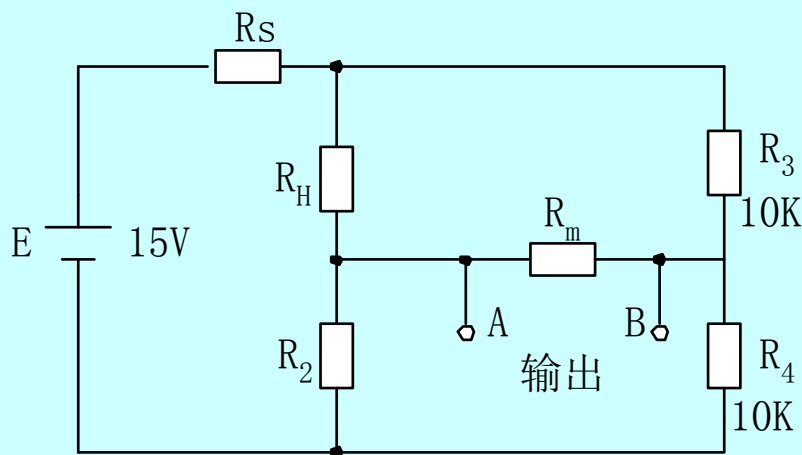
相对湿度 (RH) 受温度影响较大，一个有限空间内因空气的热传导率低温度分布不均，室内湿度会产生较大的误差；

绝对湿度 (ρv) 随温度变化不大，不受水蒸气分布的影响，测量比较准确。

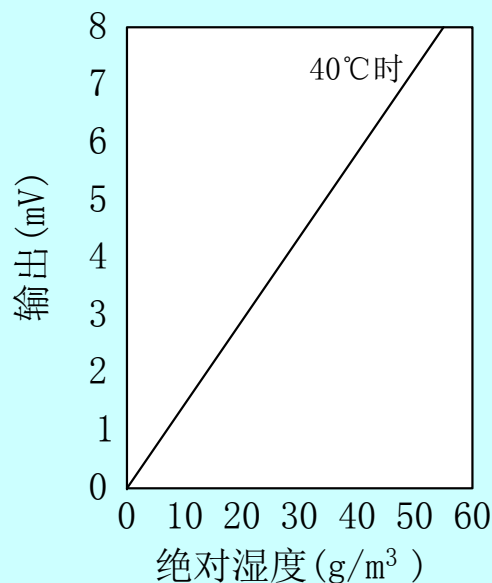
热敏电阻绝对湿度传感器

——由两个热敏电阻构成，各自加热到约 $170\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，其中一个封入干燥空气成为补偿组件 R_2 ，另一个开放型作为感湿组件 R_H ，构成电桥(如图)：**原理：**由于水蒸气的热传导率比空气的大，**空气的热传导率**随湿度变化，使感湿元件阻抗变化。桥路随阻抗变化输出与绝对湿度基本成正比。

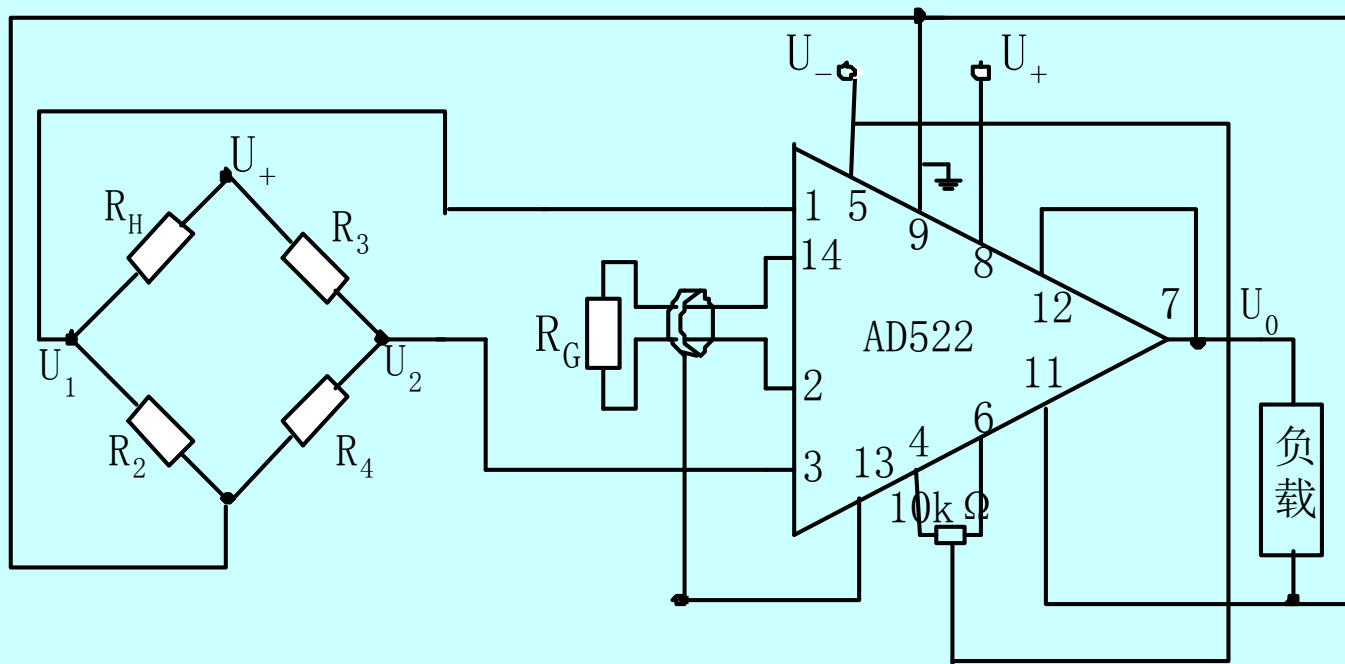
芝浦电子所CNS—1型绝对湿度输出特性图



R_H : 湿敏元件 R_2 : 温度补偿元件
 R_m : 输出回路电阻



实用绝对湿度计原理图



图中： R_H 为开放型热敏电阻（感湿组件）， R_2 为密封型热敏电阻（补偿组件）， R_3 和 R_4 为温度系数很小的电阻。

AD522是单芯片集成精密测量放大器。管脚1.3接输出，4、6接10k Ω 电位器调零点，其滑动端接负电源。2和14端连调整放大倍数；13端为数据屏蔽网以减少外电场对输入信号的干扰，参考端11接地。

放大倍数G:

$$V_0 = \left(1 + \frac{200K}{R_G}\right) \left[(V_1 - V_2) - \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \times \frac{1}{CMRR} \right) \right]$$

当共模抑制比 $CMRR \gg 1$ 时，则有：

$$V_0 \approx \left(1 + \frac{200K}{R_G}\right) V_{IN}$$

输入电压 $V_{IN} = V_1 - V_2$

响应时间约12至13秒。

使用时需等加热稳定使测量结果准确。

HS—5型由两个热敏电阻对构成，可与电桥组装在一块印刷电路板上。

CHS-2传感部直接由输出电压读取绝对湿度。

6.2.1 陶瓷电阻式湿度传感器

6.2.2 热敏电阻绝对湿度传感器

6.2.3 高分子电阻式湿度传感器

一、高分子结构效应型湿度传感器

- 1. 感湿电阻膜：**由含有强极性基的高分子电解质及其盐类如 $-\text{NH}_4^+\text{Cl}^-$ 、 $-\text{SO}_3^-\text{H}^+$ 、 $-\text{NH}_2$ 等高分子材料制成。
- 2. 工作原理：**利用高分子电解质在不同湿度下电离产生不同数量的导电离子使阻值变化，测定环境中的湿度。

低湿吸附下，由于没有荷电离子产生，电阻值很高。

相对湿度增加时，凝聚化的吸附水成为导电通道，高分子电解质的成对离子起载流子作用，吸附水自身离解的质子（ H^+ ）、水和氢离子（ H_3O^+ ）也起载流子作用，使电阻急剧下降。

3. 元件结构与应用

元件结构图：感湿膜——由PVA（聚乙烯醇）和PSS（聚苯乙烯磺酸铵）组成。

基片——厚 0.6mm氧化铅，

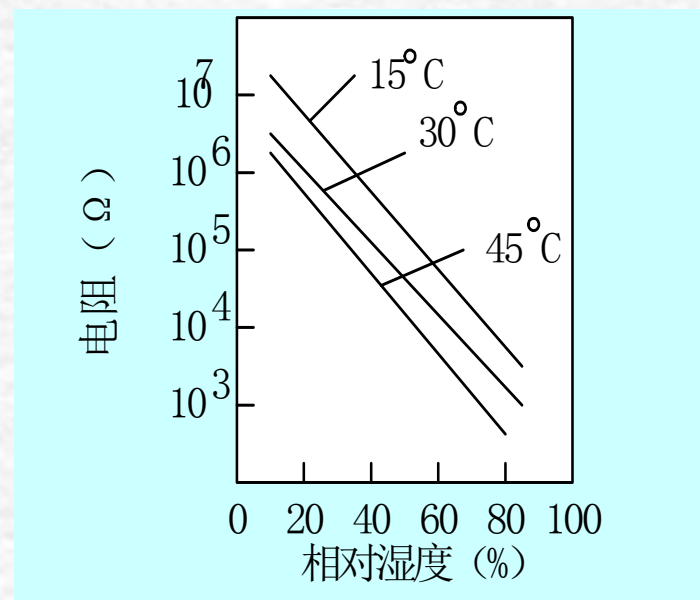
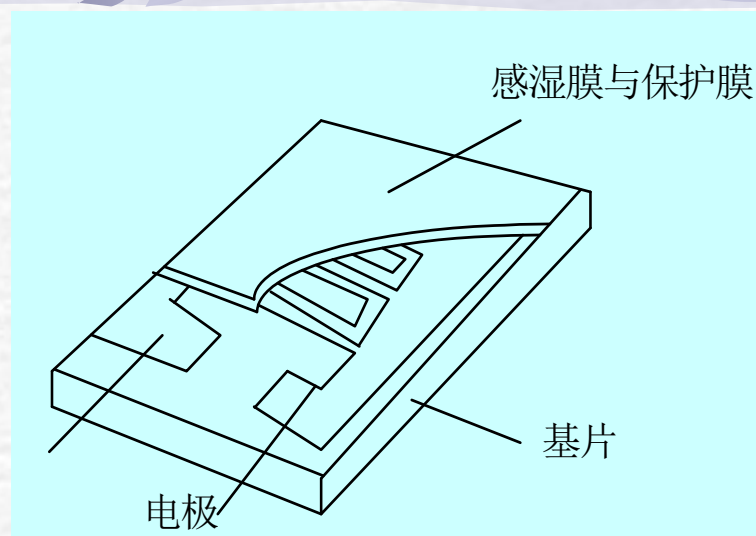
电极——Au做成叉指型。

利用导电性高分子对水蒸汽的物理吸附引起电导率变化；

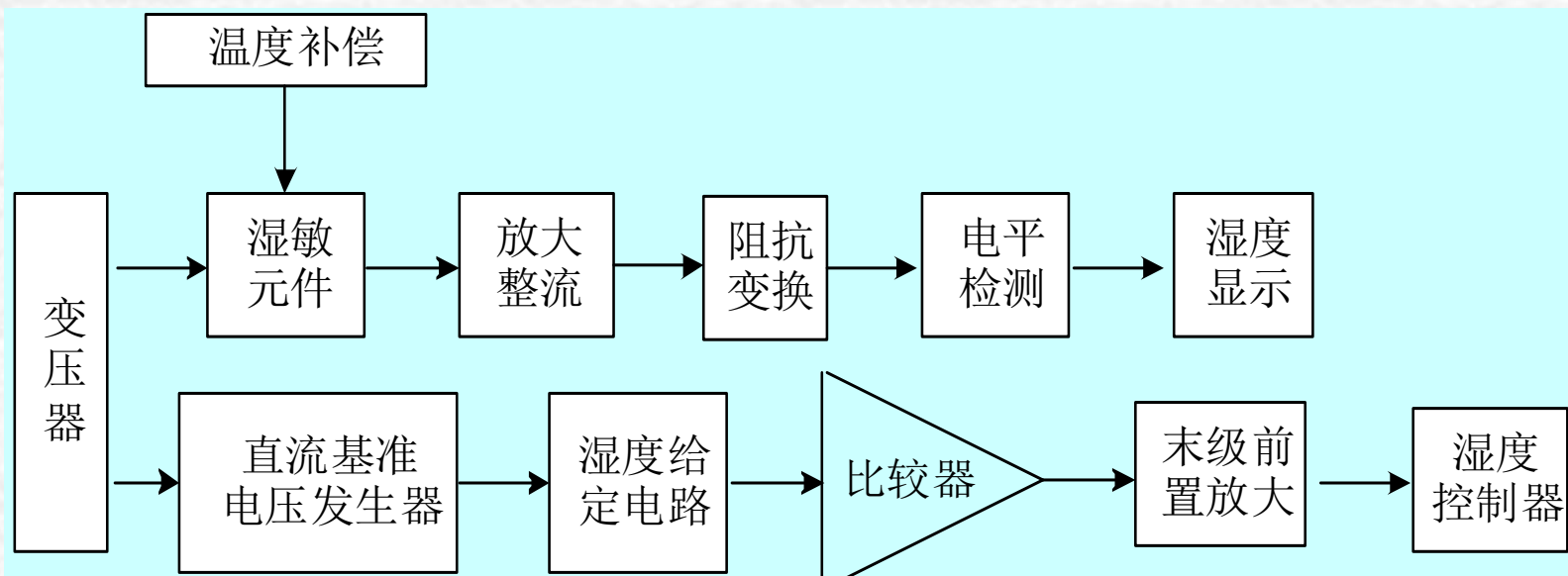
感湿膜湿度特性曲线图：

存在温度影响，故需温度补偿。

优点：测量湿度范围大，工作温度在0~50℃，响应时间短（<30 s）。



湿度检测控制系统方块图



为防直流电压时产生极化，用50~60Hz交流电源供电，

温度补偿的热敏电阻与湿敏电阻匹配，

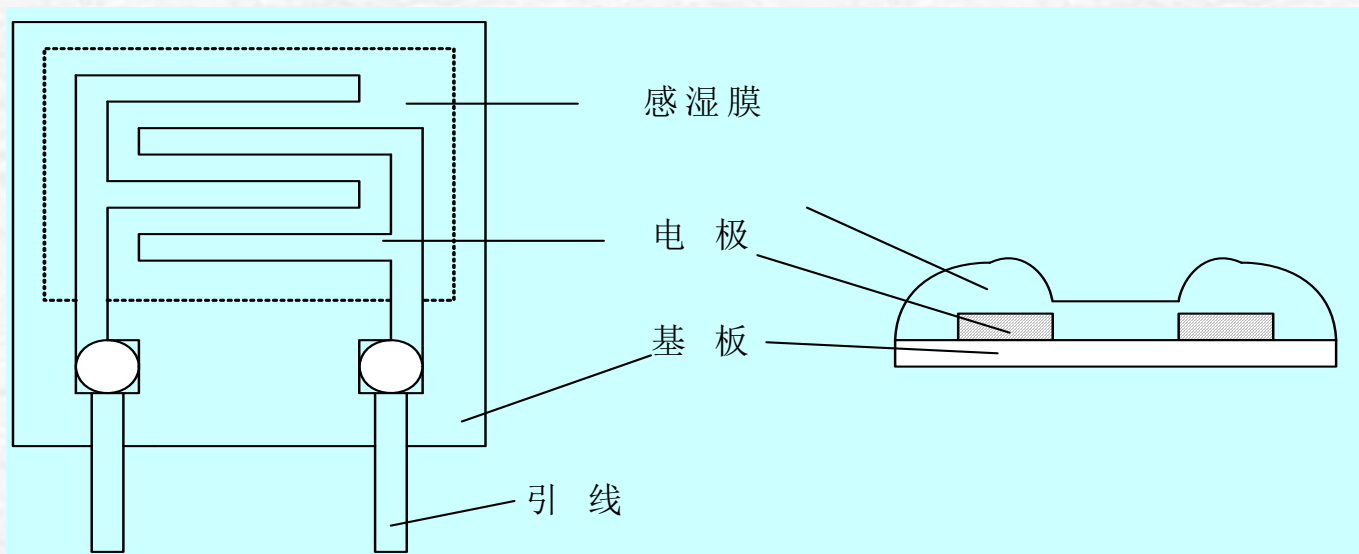
组件外用发泡体聚丙烯包封构成过滤器以防止灰尘、水和油等直接与感湿膜接触。

二、高分子胀缩型结露传感器

1. 结露传感器的结构

氧化铝基板上制作梳状电极，覆盖一层具有胀缩物粘合剂的聚合物感湿性高分子为主体、掺入导电性微粉的感湿膜，它吸湿后产生体积变化。

通过改变感湿功能聚合物与三维化学材料的比率，调整灵敏度、耐湿性、稳定性及阻值。



2、原理： 感湿膜的电阻与湿度 m 变化规律为：

$$R_H = e^{(a/C)m}$$

R_H 为感湿膜的体电阻， C 为导电微粉浓度， a 为由树脂、导电微粉决定的系数

在低湿时，感湿膜吸附水分较少，亲水性树脂处于收缩状态，导电微粉浓度相对较高，微粉间距较小，阻值较低。

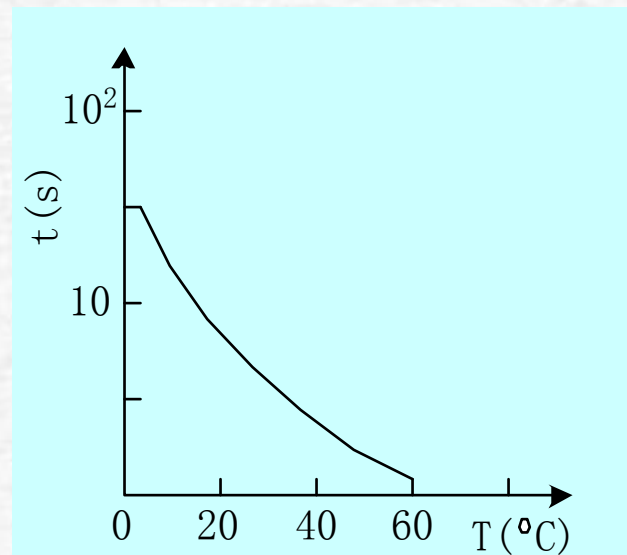
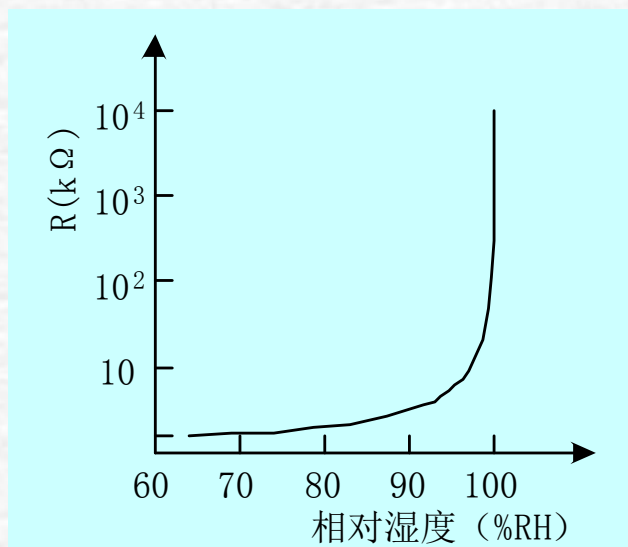
湿度增加，膜吸收水分增多，微粉间距增大，阻值相应增加。

高湿区出现结露现象时，亲水性树脂吸湿量大大增加，感湿膜急剧膨胀，微粉浓度迅速下降，微粉构成的导电链越过“临界状态”，微粉间连接极弱，阻值急剧增大，在结露点附近产生了电阻的开关型变化。

3. HDP型结露传感器的特性

湿度-阻值特性曲线：结露时阻值可骤增2~3个数量级，开关特性优异。

响应时间—温度关系：由于体积小，感湿膜很薄，响应速度很快，常湿下仅为1~2s。



使用电压为5.5VDC，远高于其它品种（0.8V），

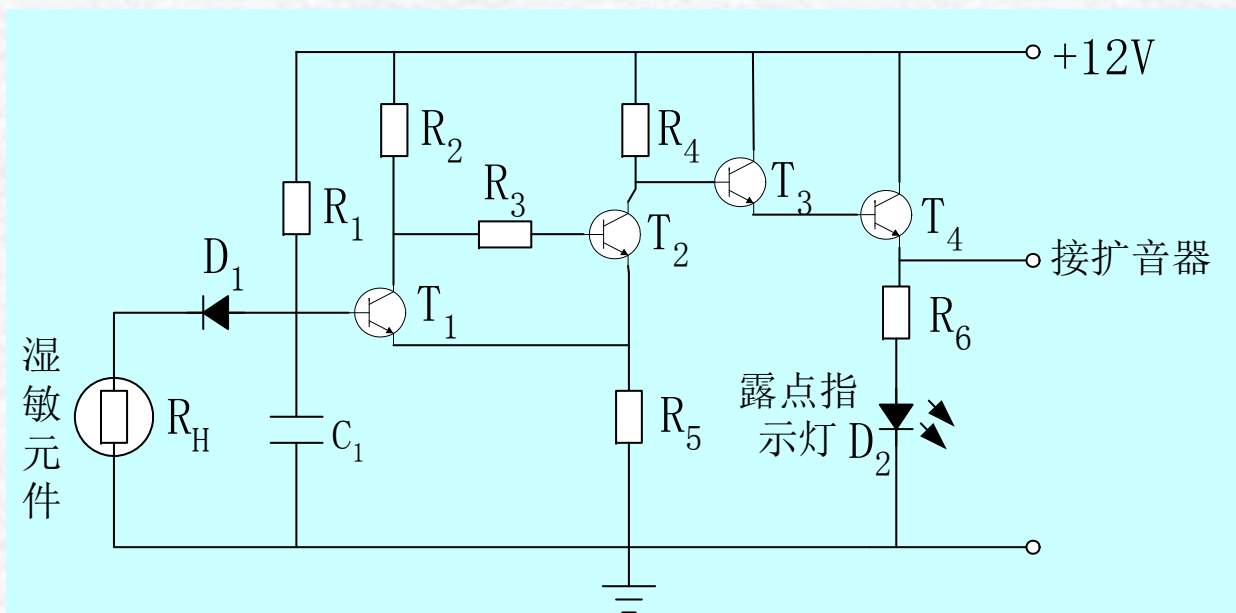
可在其它高分子湿敏组件难以突破的高湿领域使用，且长期稳定。

4. 结露传感器的应用

测量电路：把结露组件安装到需检测的附近，**当出现结露时**机器自动进入强制停机状态。

如**磁带录像机因结露而附着水珠**，磁带和移动机构间的摩擦力发生变化，使磁带的走速不稳定，磁鼓和磁头的磁粉会受到损坏。

可用于检测和防止摄像机和VCD结露、轿车风挡和陈列窗玻璃结雾、复印机和建筑材料结露、高压配电柜结露等等。



6.3 电容式湿度传感器

6.3.1 多孔 Al_2O_3 —陶瓷电容式湿度传感器

6.3.2 高分子电容式湿度传感器

6.3.3 集成电容式湿度传感器

一、多孔湿敏电容模型

基于单元气孔的平行板电容器效应，

结合理想结构模型、吸附模型，

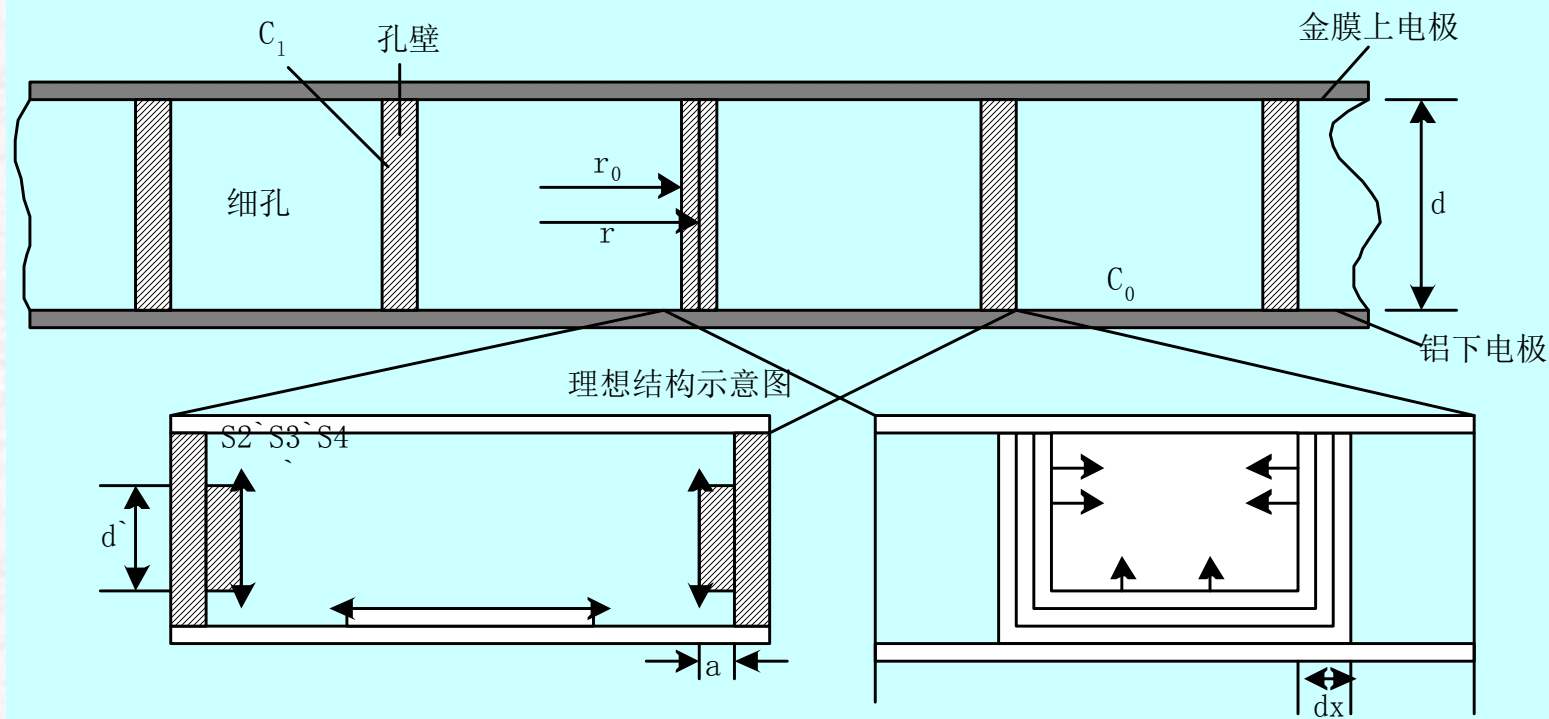
建立不同湿度下的湿敏电容模型。

在建模时，忽略气孔底与下面金属间的电容、水吸附产生两相界面电容，及毛细管凝聚的修正。

该模型只能定性分析一些湿敏现象。

1. 无湿度条件下的湿敏电容

湿度为0时，湿敏电容模型理想结构示意图：



(a) 低湿度单层吸附示意图

(b) 高湿度多层吸附示意图

r_0 为孔的半径； d 为薄膜的厚度； d' 为水的有效厚度，

C_1 为固态 Al_2O_3 介质电容， C_0 为无湿度时细孔的电容值。

S_2' 为有效物理吸附极板面积， a 为水的单分子吸附层厚度约为3.0埃

表示为：

$$C_1 = M \frac{\varepsilon_1 S_1}{d} = M \frac{\varepsilon_1 \pi (r_1^2 - r_0^2)}{d}$$

$$C_0 = M \frac{\varepsilon_0 S_0}{d} = M \frac{\varepsilon_0 \pi r_0^2}{d}$$

ε_1 为 Al_2O_3 介质的介电常数约为**8.6**； ε_0 为空气介质电常数约为**1**。
 M 为孔的个数；

器件的电容为：

$$C = C_1 + C_0$$

2. 低湿度条件下的湿敏电容

在低湿度范围内，随湿度的增加开始第一物理吸附层，湿度达40%时第一物理吸附层接近完成，形成一层连续的水膜。

在低湿度水蒸汽吸附属单分子吸附。

Langmuir单分子吸附方程知，表面覆盖度 $\theta \equiv N/N_\infty$ 与水蒸汽的相对蒸气压 p_v 的关系为：

$$\theta = \frac{bp_v}{1 + bp_v}$$

b为温度T的函数常数

在压力甚低时，分母中的 bp_v 相对于1可忽略， θ 与 p_v 成正比；

压力增到一定值时（多孔 Al_2O_3 膜的相对湿度为40%时），1相对于 bp_v 可忽略， θ 达到饱和值。

低湿度下器件的电容为： 设孔底和孔壁的第一物理吸附层同时完成覆盖，单孔湿敏电容模型低湿度单层吸附

$$C = C_1 + \frac{MS_2'}{\frac{d'}{\varepsilon'} + \frac{d-d'}{\varepsilon_0}} + M \frac{S_3'}{d} + M \frac{S_4'}{\frac{a}{\varepsilon'} + \frac{d-a}{\varepsilon_0}}$$

S_2' 为有效物理吸附极板面积， S_3' 为无水区极板面积， S_4' 为单分子吸附层对应极板面积， ε' 为水的相对介电常数约为80； a 为水的单分子吸附层厚度约为3.0埃。

因 $\varepsilon_0 \ll \varepsilon'$ ， $a \ll r_0$ (几百埃) $\ll d$ (几个 μm)，简化为：

$$C \approx C_1 + C_0 + M\pi \frac{2r_0a}{d(1-\theta)} - M \frac{2\pi ar_0}{d} \approx C_1 + C_0 + M\pi \frac{2r_0ab}{d} p_v$$

∴在低湿度的条件下，电容是与相对湿度 ($\rho_{\text{相}} = p_v/p_w \times 100\%RH$) 成正比变化

3. 高湿度条件下的湿敏电容

在高湿度内，会形成多层物理吸附层。

高湿下湿敏电容模型（单孔）器件的电容为：

$$C = C_1 + M \frac{\pi d_x (2r_0 - d_x)}{\frac{d}{\varepsilon'}} + M \frac{\pi (r_0 - d_x)^2}{\frac{d - d_x}{\varepsilon_0} + \frac{d_x}{\varepsilon'}}$$

V_m 为饱和吸附分子的体积，
H为T的函数常数
n为最大的吸附层数，
x为相对湿度

d_x 为水分子吸附层的厚度

$$C \approx C_1 + C_0 + \frac{M}{d^2} (\varepsilon' - \varepsilon_0) \frac{V_m H x}{1 - x} \times \frac{1 - (n + 1)x^n + nx^{n+1}}{1 + (H - 1)x - Hx^{n+1}}$$

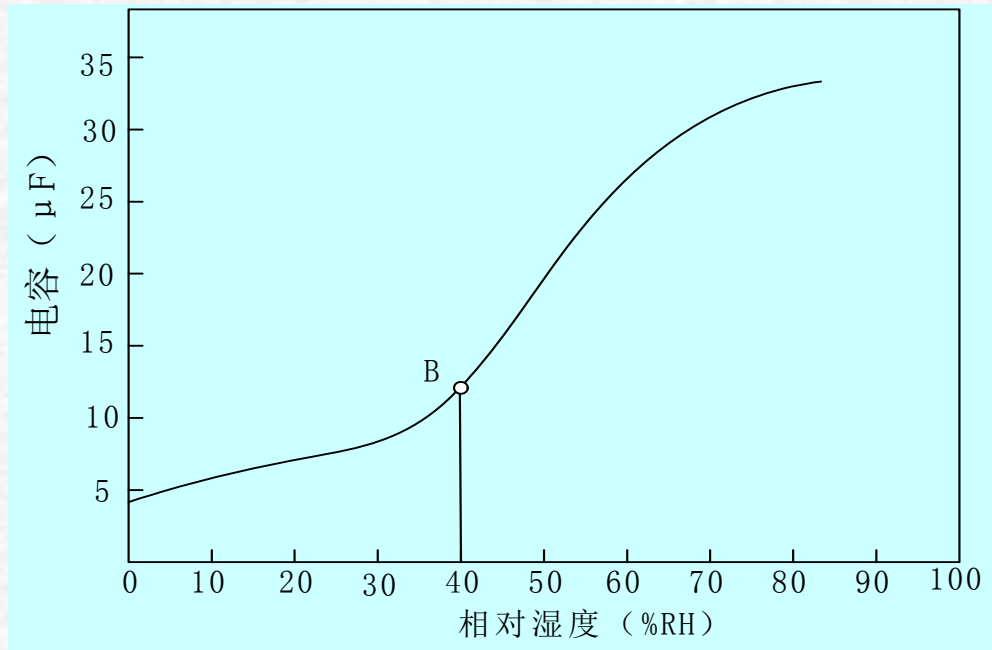
∴ 高湿范围内，电容与吸附分子体积V成正比，
与相对湿度x之间关系是非线性的。

二、电容湿敏感湿特性

当 Al_2O_3 气孔中有一定水汽吸附时，其电特性既不是一个纯等效电阻，也不是一个纯等效电容，湿度变化膜电阻和膜电容都将改变。

图，对于电容—相对湿度特性的模型分析与实际测量曲线有着非常好的吻合。

湿度增加电容值增加。



多孔 Al_2O_3 湿敏组件的电容-湿度曲线

低湿度范围有好的线性，高湿范围线性变差，湿度进一步提高曲线渐变平缓。

随着孔的个数 M 的增加，电容值是增大的。

6.3.2 高分子电容式湿度传感器

一、工作原理

电极间高分子感湿材料吸附水分子时 ϵ 变化，其电容量

$$C_{pu} = \epsilon_0 \epsilon_u \frac{S}{d}$$

ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_u 为相对湿度U%RH时高分子的介电常数；
S为电极的有效电极面积；d为高分子感湿膜厚。

其中 $\epsilon_u = \epsilon_r + aW_u \epsilon_{H_2O}$

$$W_u = b(P / P_0)$$

C与环境中水蒸汽相对压 (P/P_0) 成正比

ϵ_r 为0%RH时高分子介电常数，a、b为常数， W_u 为U%RH时高分子单位质量所吸附水分子质量， ϵ_{H_2O} 为高分子中吸附水的介电常数。

二、感湿电容及其特性

高分子感湿材料设计应符合：

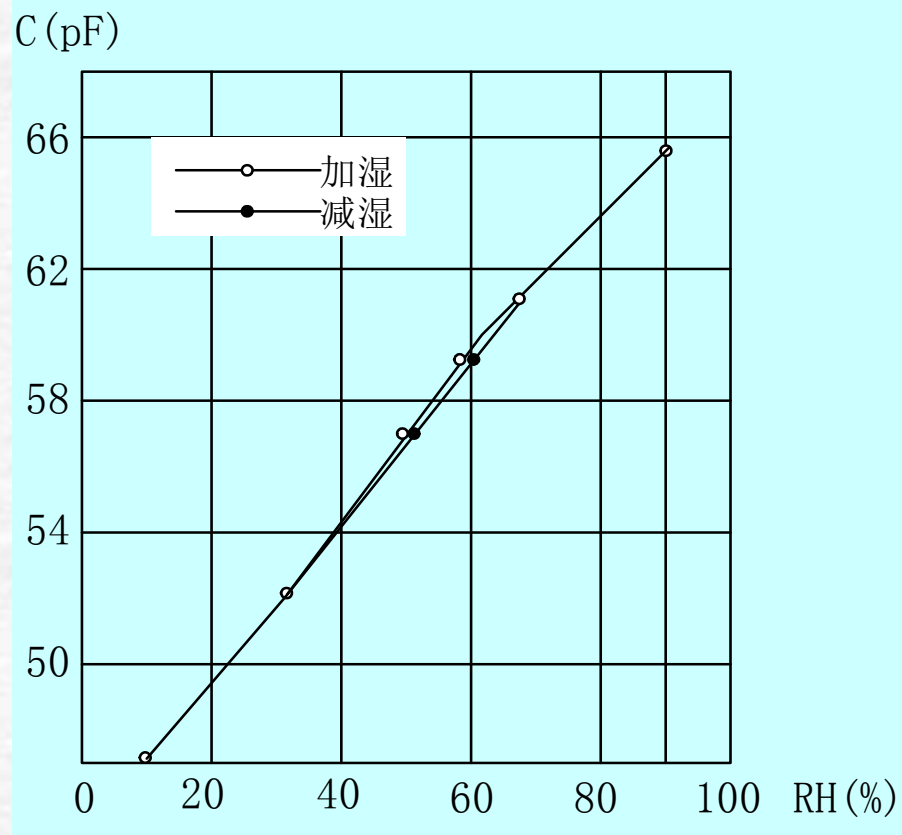
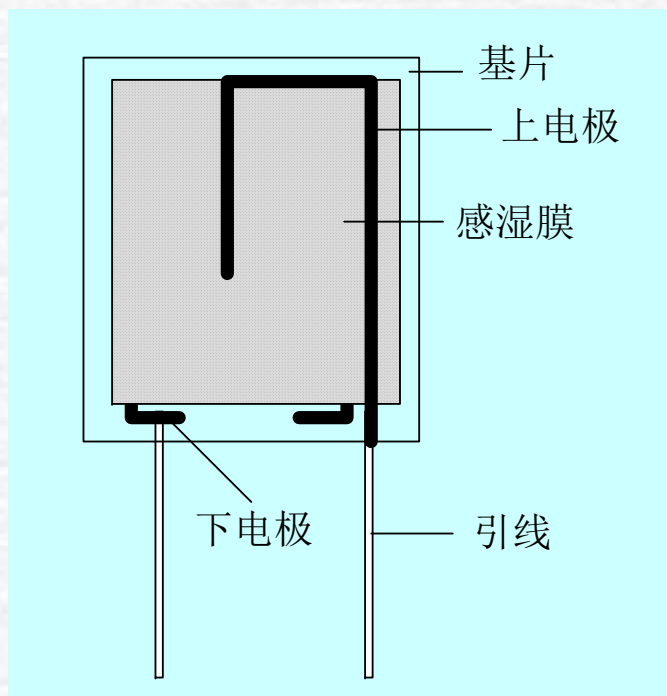
1. 灵敏度随相对湿度变化呈线性，湿滞要小，温度系数小，输出不受其它气体影响。
2. 吸附量小且为物理吸附时，吸附水分子的量与平衡相对压 (P/P_0) 呈线性关系。
3. 含有较弱极性基醚键 ($-O-$)、羰基 ($-CO-$)、巯基 ($-SO_2-$) 等疏水性高分子材料，如醋酸丁酸纤维素 (CAB) 以及聚酰亚胺 (PI) 等是亲水性较弱的聚合物。

∴ 较大偶极矩的极性基与水分子有较强作用形成氢键结合，为化学吸附。很难脱附，产生湿滞——防止或减弱水分子的凝聚是减小湿滞的关键之一（被吸附的水分子间相互作用产生凝聚 (Cluster)）

∴ 可用疏水基分隔极性基防止吸附水分子凝聚，有代表性的疏水基有烷基、苯基等碳氢、碳氟化物。

另外，交联剂可封闭多余的吸水基，形成微孔结构，控制微孔尺寸以阻止吸附水分子之间的相互作用。

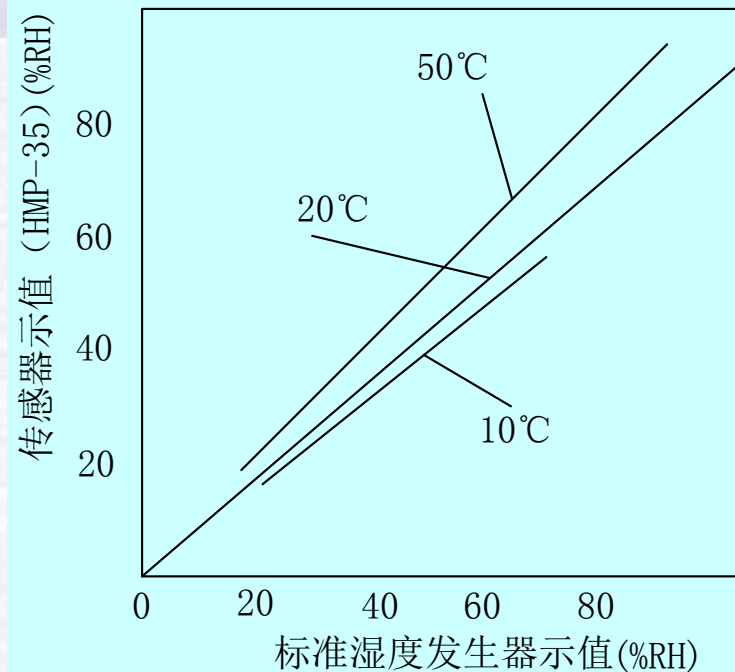
左图为MSR—1型高分子电容式湿度传感器结构，右图为感湿特性曲线。



Vaisala 湿度传感器特性

高分子湿度传感器**温度系数 α** 是非线性的，在 10~30°C 内接近于常数 (0.05~0.5%RH/°C)，-5~+20°C 内有5%的漂移，-40~-5°C 漂移达35%。

因某些温区介电常数 ϵ 随温度呈上升趋势，某些温区 ϵ 则下降



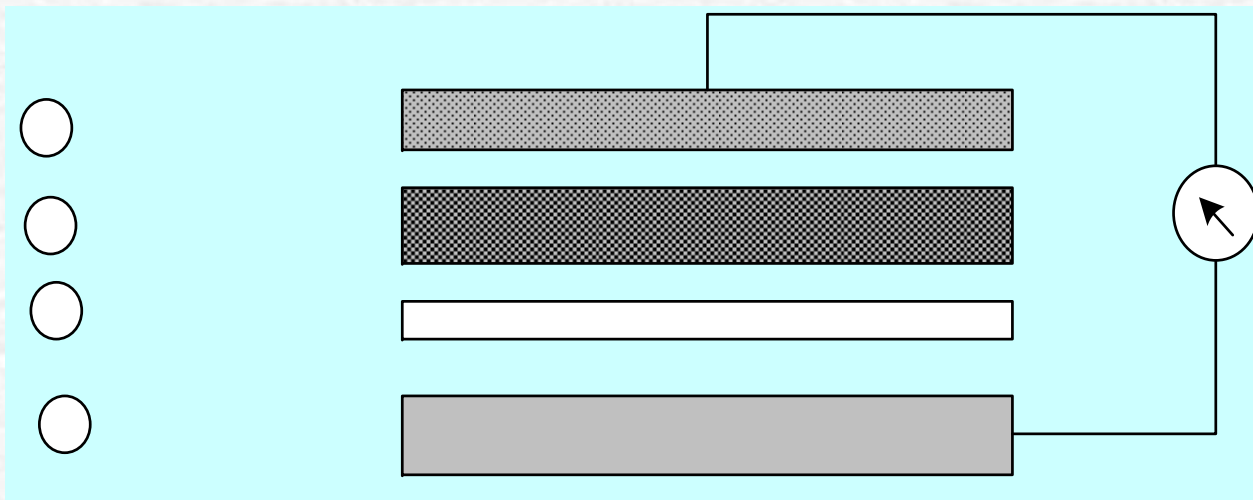
∴ 温度上升，高分子聚合物的平均**热线膨胀**，介质膜厚 d 增加，对 C 呈负贡献；但膨胀又使介质对水的吸附量增加，又呈正值贡献。

可见湿敏**电容的温度特性**受多种因素支配：不同的湿度温漂不同，不同的温区呈不同的温度系数，不同的感湿材料温度特性不同。总之， α 并非常数。

∴ 高分子介质在吸湿后，多相介质复合 ϵ 有加和性，提高了吸水异质层的 ϵ ，使**湿敏电容的 C 与相对湿度成正比**。

三、Humirel相对湿度电容传感器

多层聚合物结构结构图：



第一层为多孔海绵状电容电极，抗机械及抗腐蚀，并在工作环境中能使水汽充分通过而阻止尘埃及化学物质通过。

第二层为电容器的多分子聚合物夹层电介质，对水汽有良好的敏感性。

第三层为超薄聚合物层，与衬底形成良好接触。

第四层是用高密度材料的金属衬底电极。

测量环境湿度时，水汽通过多孔海绵状电极到电介质层被吸收使介电常数改变，导致电容器输出值升高，测量即可得湿度与电容的关系。

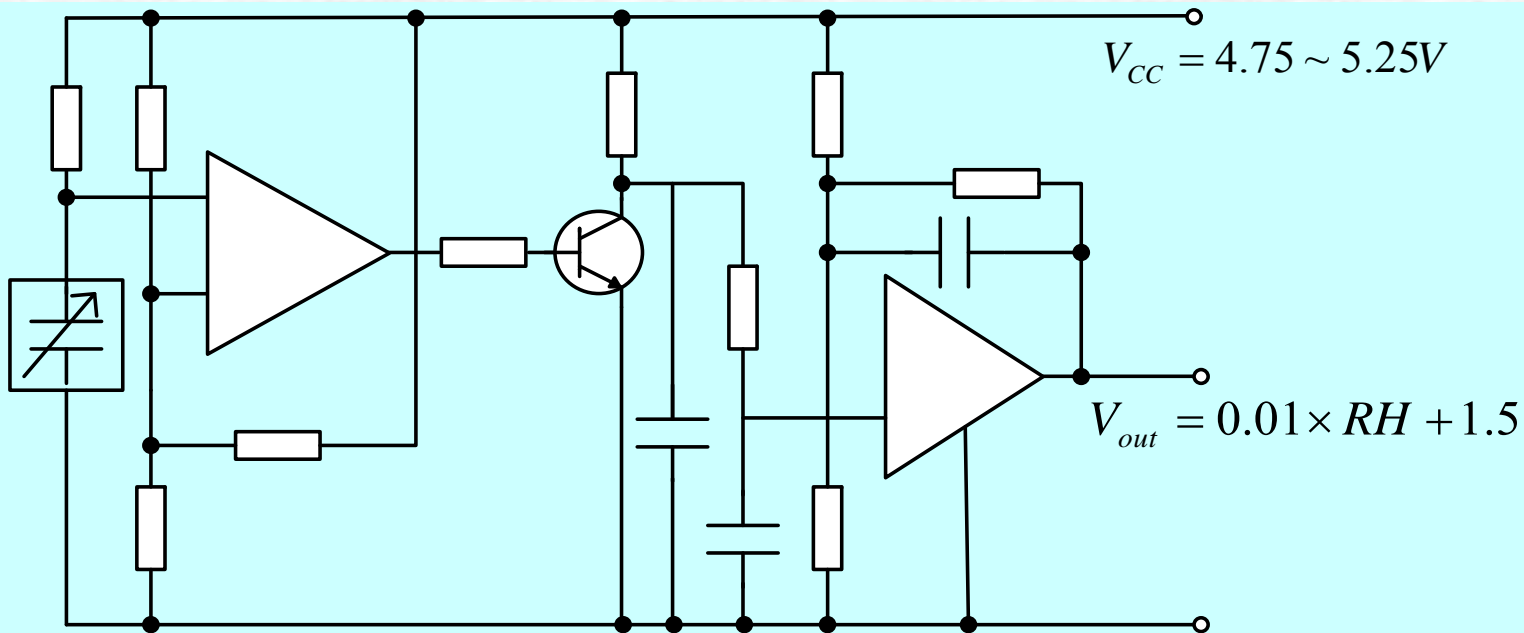
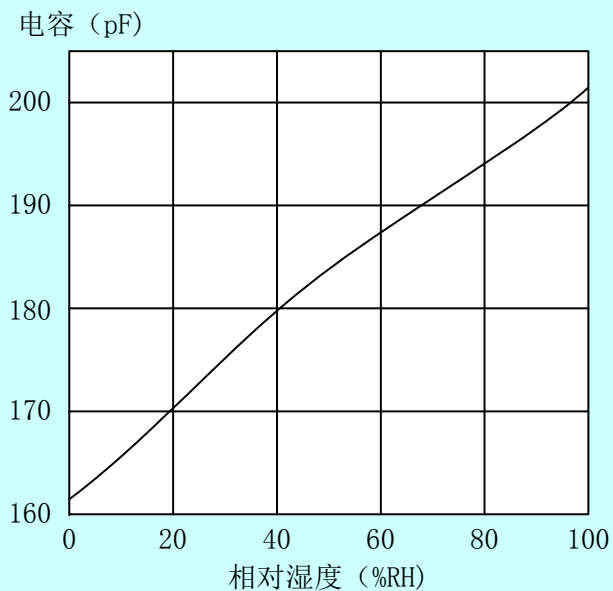
4 金属衬底

MHS1100 **相对湿度传感器**：有完全互换性、较高的可靠性、长期稳定性、可瞬间恢复。

采用固态多聚物使其适用于包括浸在水中的自动装配过程。如图，**线性关系**。

湿度传感器的线性输出应用电路：

运放IC₁、运放IC₂、T₁都是放大

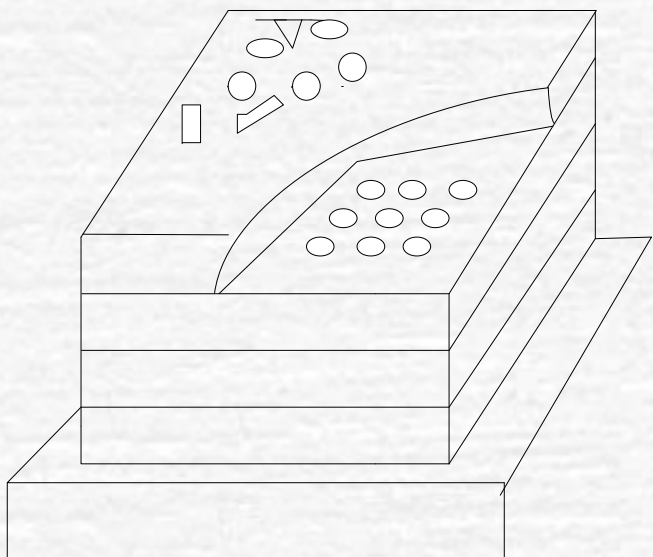


6.3.3 集成电容式湿度传感器IH3605

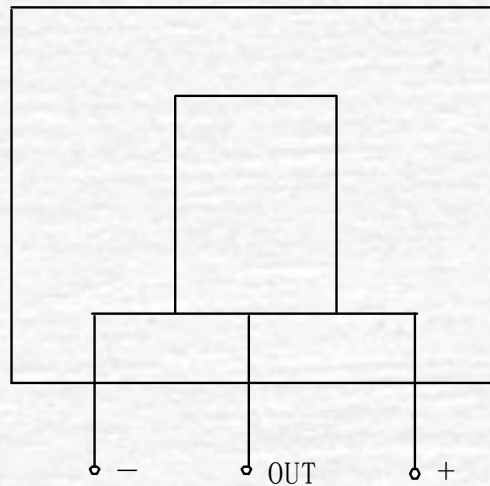
功能：片内可完成信号的调整、精度高、线性好。

结构图：两个热化聚合物层间形成的平板电容器C 可随湿度变化
热化聚合物层有防御污垢、灰尘、油及其它有害物质的功能。

其引脚图：



IH3605结构示意图



IH3605引脚图正视图

一、IH3605的电压输出特性

IH的输出电压较高且线性较好，无需放大及信号调整

温度影响原理：实际相对湿度值的两步计算

1. 计算出25℃的相对湿度值 RH_0

$$U_{out} = U_{DC} (0.0062RH_0 + 0.16)$$

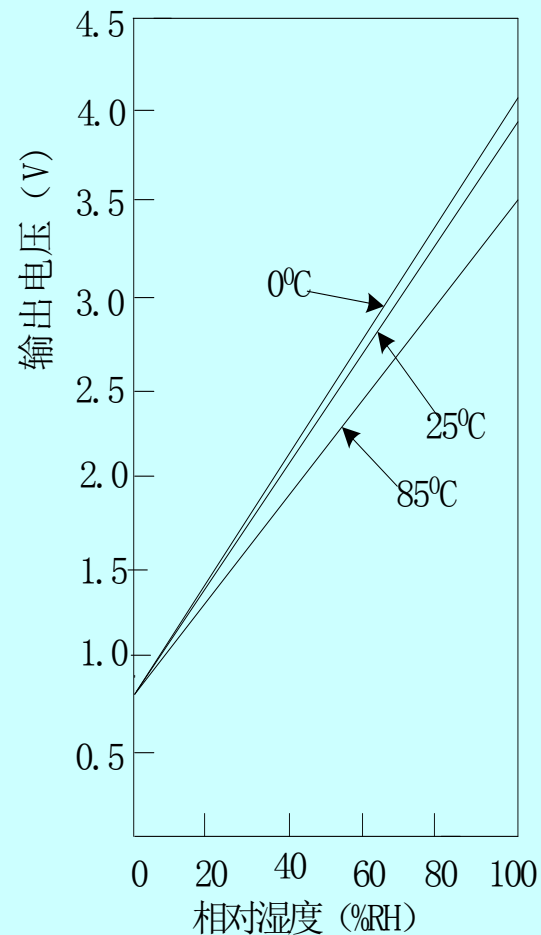
U_{out} 为IH3605的电压输出值， U_{DC} 为IH3605的供电电压值

电源电压升高，输出电压将成比例升高

2. 计算出当前温度下实际相对湿度值RH。

$$RH = \frac{RH_0}{1.054 - 0.00216t}$$

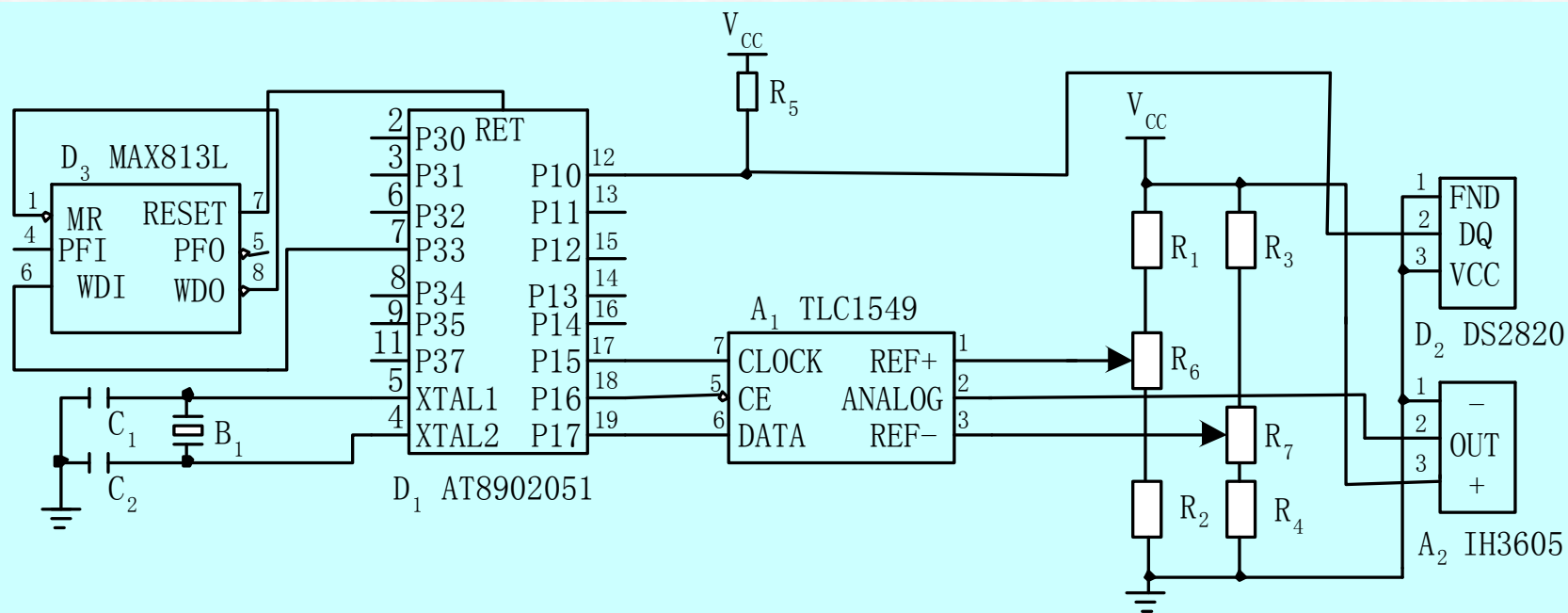
t为当前的温度值，单位为℃



二、典型应用

输出直接接到A/D上完成模数转换。

由于IH3605的输出信号范围为0.8~3.9V（25℃），应选择有设定最小值和最大值功能的A/D转换器。



核心器件: AT89C2051单片机, TLC1549十位串行A/D转换器, R₁、R₂、R₆设定A/D转换器的最大输入电压, R₃、R₄、R₇设置A/D的最小输入电压, 温度探头D₂全数字式测温集成电路DS1820, 由P₁₀读入温度值
单片机将**湿度值进行温度校正**, 得实际的相对湿度值。

湿度传感器

6.1 概 述

6.2 电阻式湿度传感器

6.3 电容式湿度传感器

6.4 其它类型湿度传感器

6.5 湿度传感器的应用实例

6.4.1 半导体结型和MOS型湿度传感器

6.4.2 新型射频传感器

6.4.3 光纤湿敏传感器

6.4.4 新型界限电流式高温湿度传感器

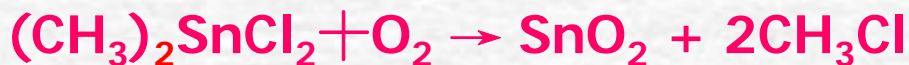
一、湿敏二极管

SnO₂湿敏二极管结构:

N型硅单晶材料:尺寸2×2mm²、厚200 μm、电阻率为5 Ω·cm

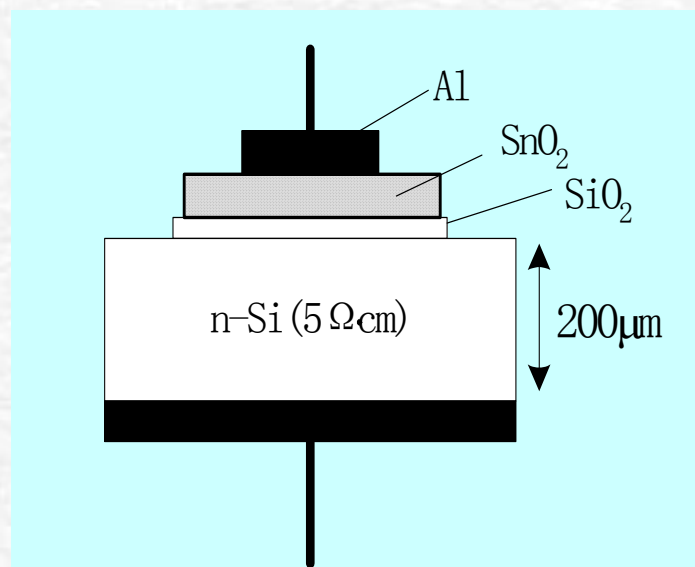
SiO₂层:10nm。

良好的导电性SnO₂:再通入携带着二甲基二氯化锡蒸汽的惰性气体，与通入的氧气发生热解和氧化反应为:

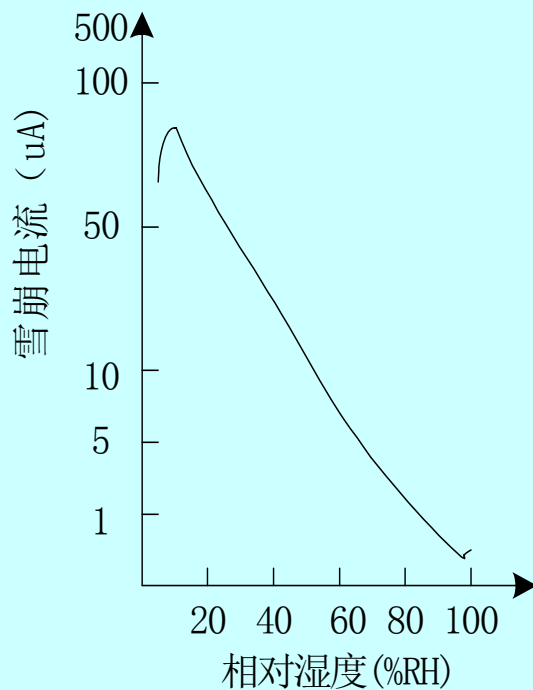


还可掺入少量的提高导电性，类同于半导体中的N型掺杂。

金属铝电极:硅片的背面和SnO₂层，为使SnO₂表面充分裸露空气中与水蒸汽直接接触，SnO₂上的电极不宜过大。



SnO₂湿敏二极管感湿特性曲线



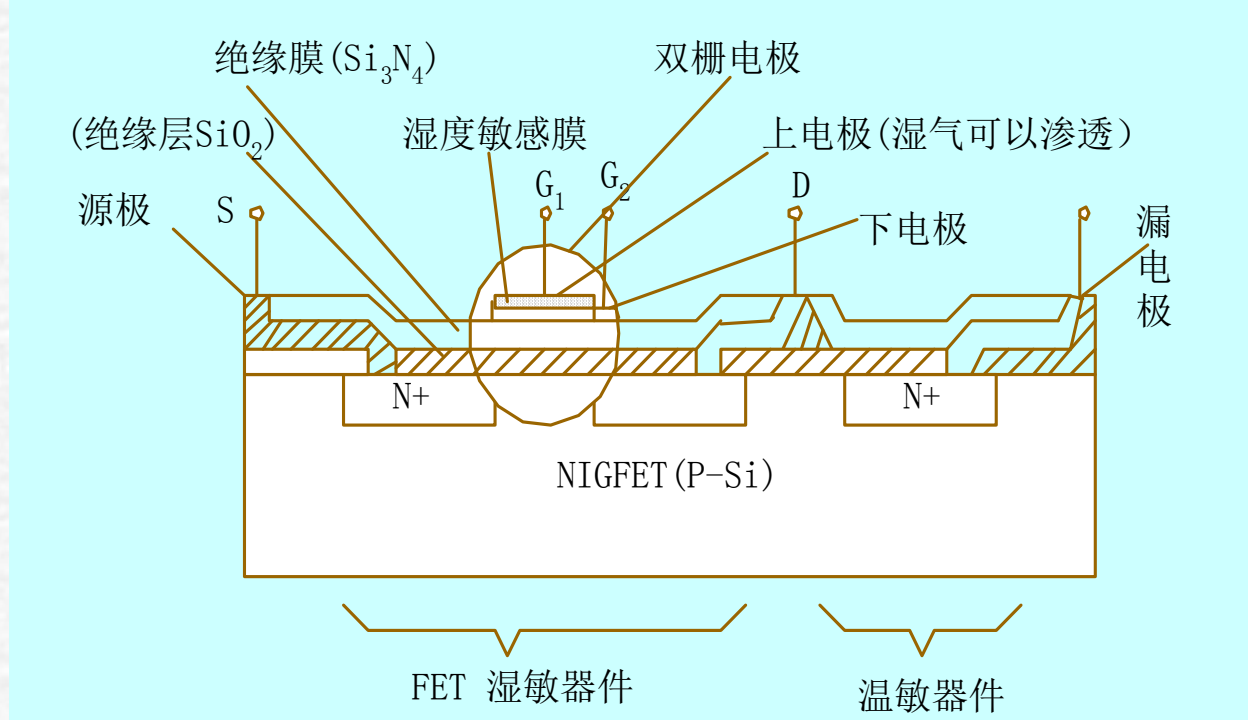
原理：当SnO₂湿敏二极管加恒定反偏电压，使二极管处在雪崩区附近，其反向电流与环境湿度直接相关，随着相对湿度的增加，反向电流减小。

由于湿敏二极管处于湿度环境时，二极管的结区边缘处吸附有水分子，使耗尽层展宽且主要向硅衬底方面扩展，有利于二极管雪崩电压的提高。如果保持反向偏置电压和负载电阻不变，那么随着相对湿度的增加，致使二极管雪崩击穿电压提高，反向电流的减小。

响应时间仅为15s，且低湿到高湿范围内都有比较高的灵敏度。

二、湿敏MOS场效应管

MOS场效应管湿敏器件：在MOS场效应管的栅极上涂覆一层感湿薄膜，增设一电极

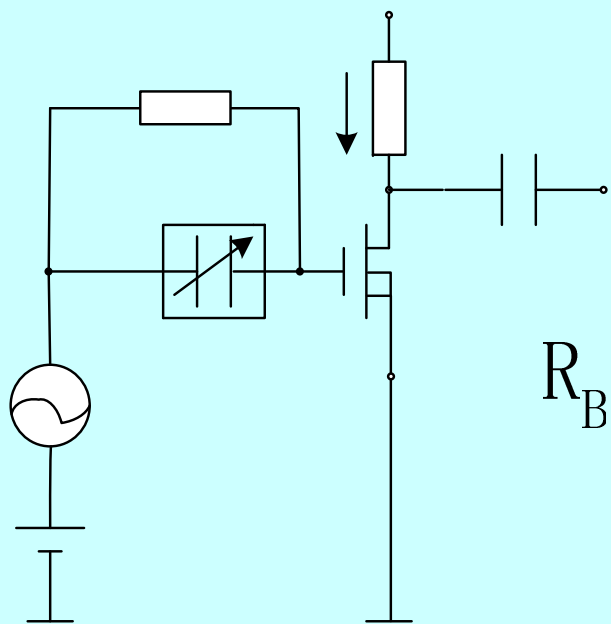


湿敏器件和热敏器件都集成在同一衬底上，如图。

在下电极和上电极（厚度10~20 μm的多孔金电极）之间沉淀1nm厚的醋酸纤维素作为**湿度敏感膜**。

聚合物湿敏材料具有机械强度高、耐高温等特点，感湿材料和几何形状直接影响器件的灵敏度和响应时间。

湿敏器件的等效电路图

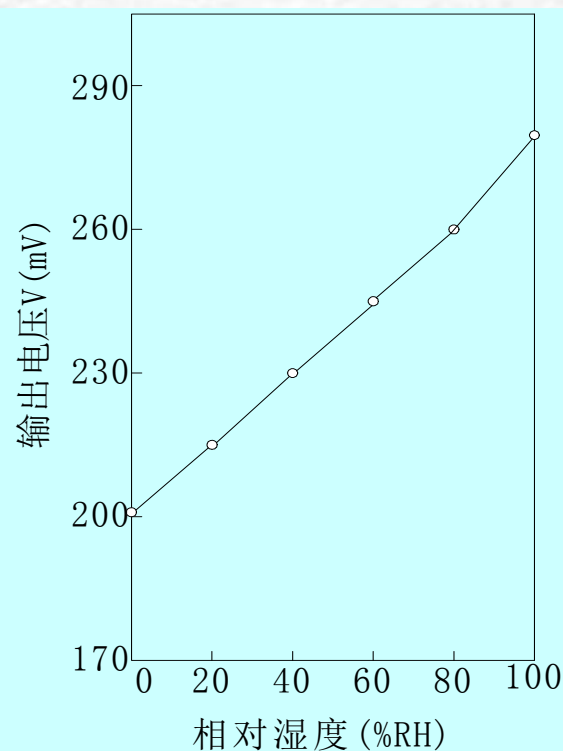


左图：施加一个直流电压 U_0 和一个交流电压于上栅电极，上栅极和下栅极用一个足够大的电阻 R_B 连接起来。其输出电压 U_{out} 与膜的电容 C_s 关系：

$$U_{out} = U_0 R_L g_m / (1 + C_i / C_s)$$

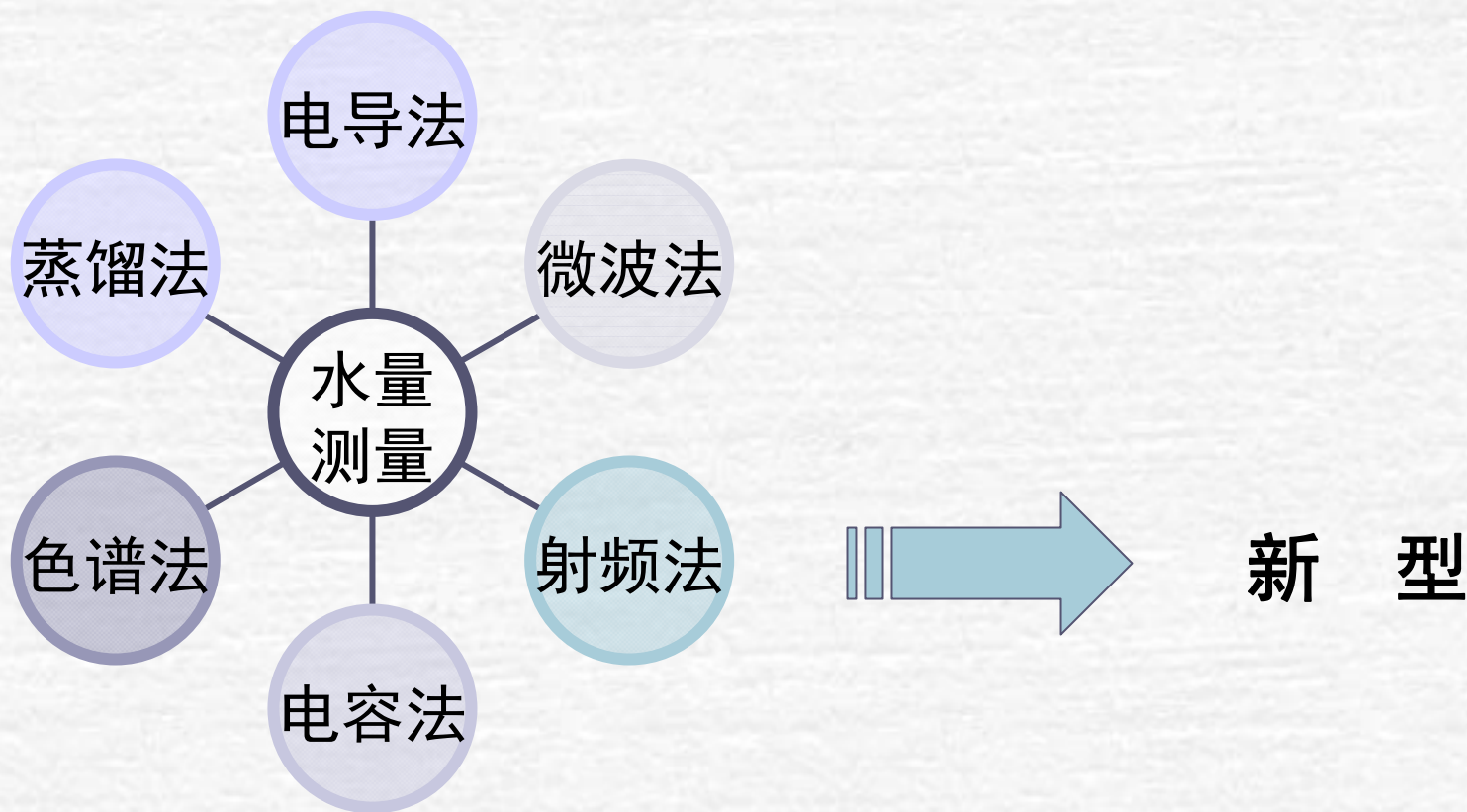
R_L 为与漏极相连接的负载电阻； g_m 为FET的跨导； C_i 为绝缘层的电容； C_s 为取决于环境的相对湿度和其它适当的常数

如图，输出电压 U_{out} 几乎同相对湿度呈**线性关系**。具有良好的精度（湿滞小于3%RH），响应时间小于30s。高湿（90~95%RH）或结露下也**长期稳定性**。



6.4.2 新型射频传感器

由于在有色冶炼中重油中的水份对炉内的燃烧和冶金反应过程有很大影响。要对其含水量进行测量。



一、射频传感器原理

多种碳氢化合物混合的**纯重油**属于非极性介质，其 ϵ 约为 2.3；

而**纯水**是极性分子， ϵ 约为80，所以含水量将显著地影响重油的 ϵ 。

含水重油可看作纯油和纯水两种介质的混合，有效介电常数 ϵ_r 介于二者之间（若忽略重油中所含杂质），表示：

$$\sqrt{\epsilon_r} = D\sqrt{\epsilon_1} + (1-D)\sqrt{\epsilon_2}$$

ϵ_1 为纯水的介电常数，
 ϵ_2 为纯油的介电常数，
 D 为介质水的体积百分比

当**射频信号**传到以油水混合物介质的**电容式射频传感器**时，其负载阻抗随着混合介质中不同的油水比而变化，混合介质的射频阻抗 Z 为：

$$Z = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega K (D\sqrt{\epsilon_1} + (1-D)\sqrt{\epsilon_2})^2}$$

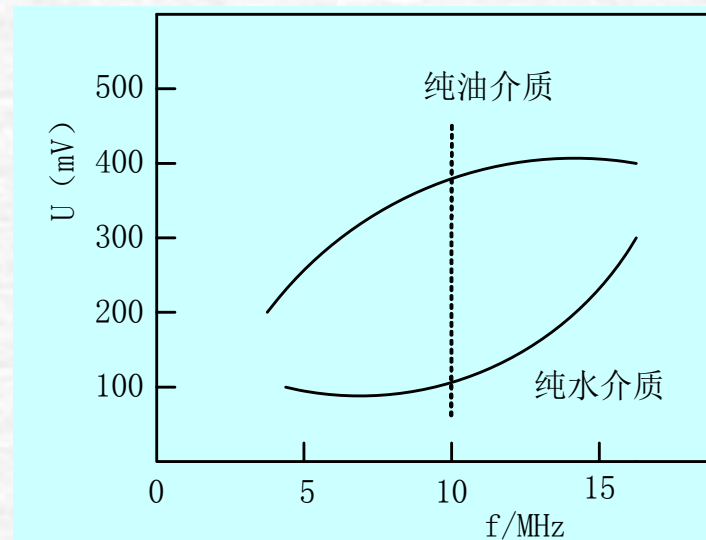
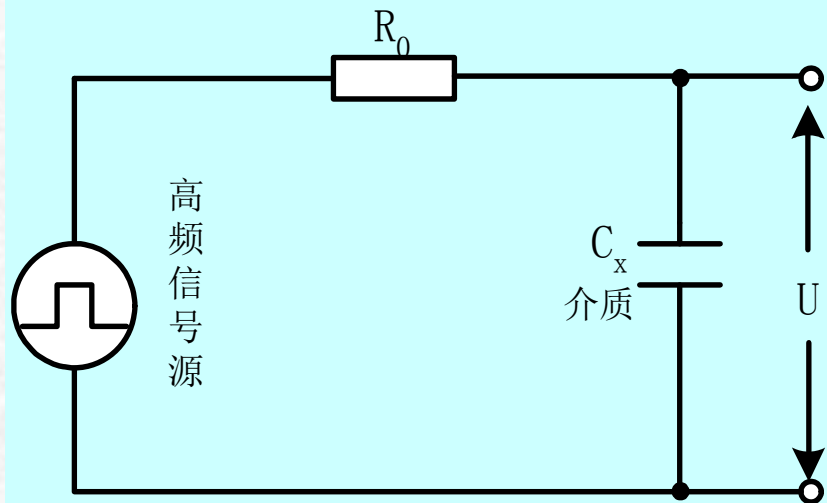
ω 为射频信号角频率
($f=10\text{MHz}$)； C 为电容
量； K 为常数，由电容器的
结构、尺寸决定。

可见，**传感器的射频阻抗 Z 与油中含水量 D 关系**——**射频式传感器基本原理**。

二、传感器探头设计

射频阻抗测量电路：测量纯水和纯油介质的输出电压（U）随射频信号频率（f）变化。

油和水的阻抗特性随f的改变而变化曲线：在10MHz频率点上，油和水的射频阻抗特性差别最大，∴把传感器的信号源频率设计成10MHz。



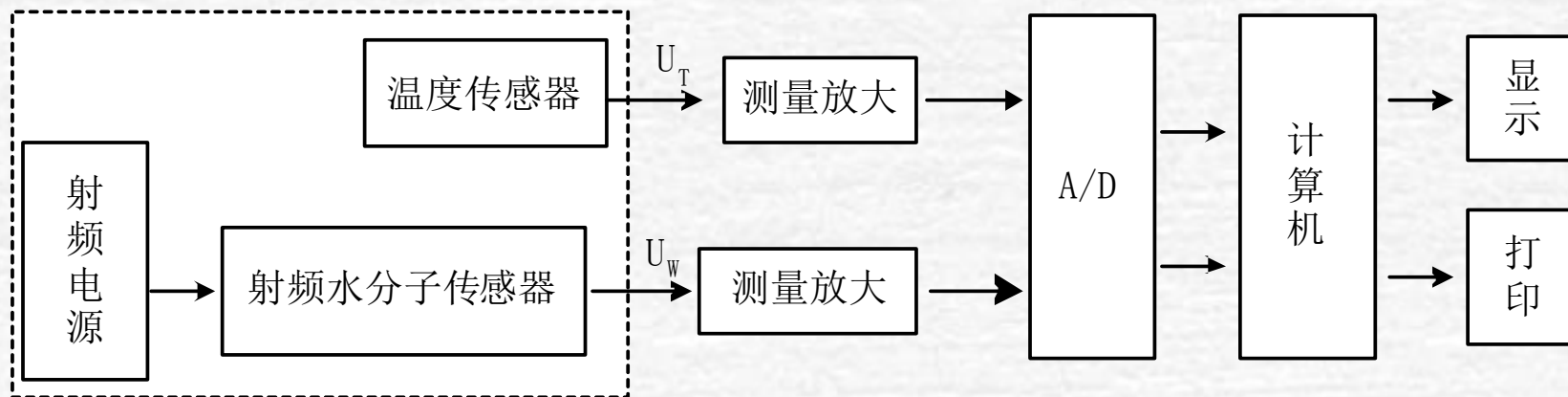
原理：若 R_0 为射频信号源输出阻抗， C_x 为测量电容器等效电容。当电容介质改变 C_x 变化，所呈现的阻抗也会改变。为减少射频信号对其它电路的干扰，将射频信号源与传感器为一体。 R_0 应满足：

$$R_0 C_{xm} < T$$

T 为射频信号源的周期； C_{xm} 为传感器测量电容器等效电容为最大时的电容量。

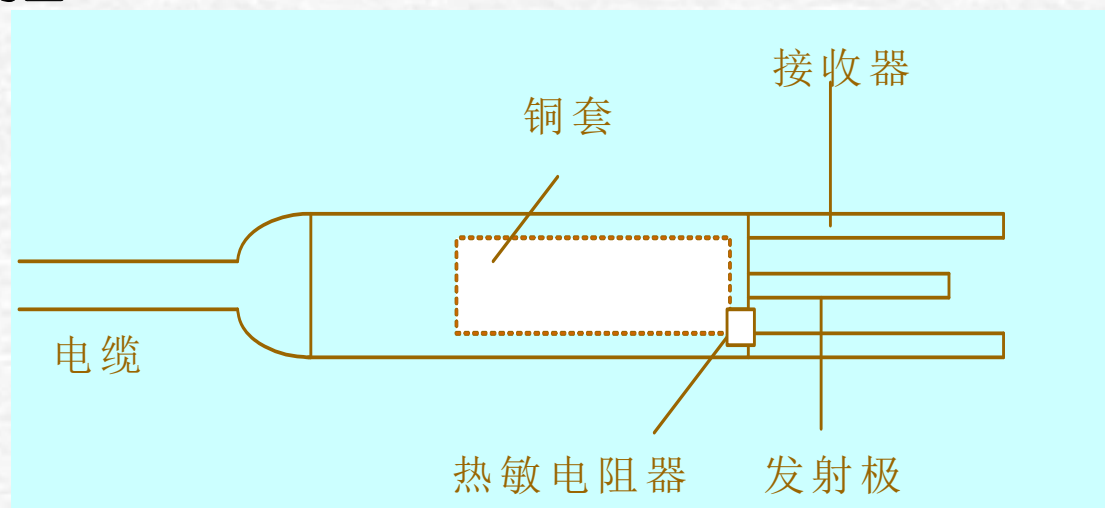
重油含水率测量系统框图：

测量时，将**传感器探头**插入样品中，检测水分电压值 U_w 和温度电压值 U_T ，两路电压信号经**滤波电路**和**高精度仪用放大器**放大后，送入PCL—711数据采集板进行A/D转换，再对数据进行处理、温度补偿、显示和打印。



测量系统框图

射频传感器探头结构图：



终端的中间为**发射极**，探头外导体上沿轴向均匀分布四根接收电极；

射频电源和转换电路集成在探头内；加上屏蔽铜套以减少外界电磁干扰；

装有一个热敏电阻器测量介质温度以便进行补偿。

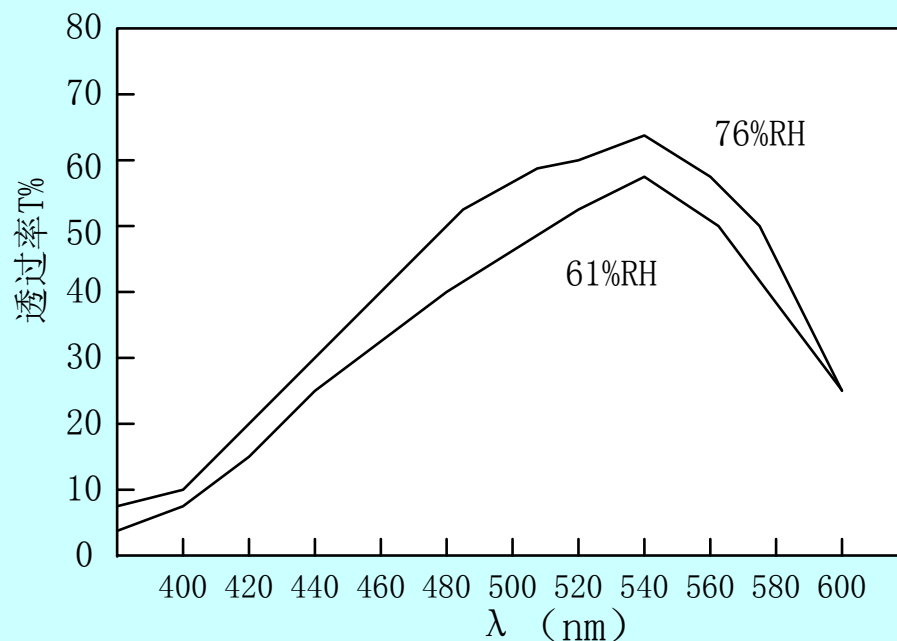
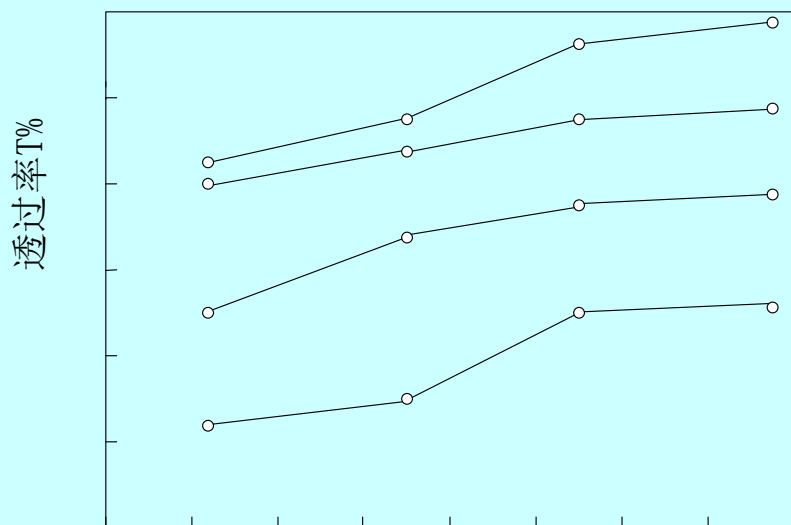
电容器敏感探头可将重油的含水率转换为探头的电容量相应的电信号，由此测出重油的含水率。

6.4.3 光纤湿敏传感器

优点：可在易燃、易爆、有毒、强化学腐蚀的恶劣环境下进行远距离测量。

一种新型湿敏材料：用溶胶-凝胶法制备的 $\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$ 薄膜具有湿敏光学特性。

湿敏—光谱特性曲线图：湿度越大，透过率越高。对不同的波长，透过率随着相对湿度的升高而升高。



TiO₂/V₂O₅光学薄膜有较好的湿敏效应:

1. 当空气中水分子含量很少时, n型半导体TiO₂吸附将表现为金属离子与水中OH⁻的吸引, 使原来氧俘获的电子局部释放载流子浓度增加。

环境湿度增加水分子的吸附量增加, 表面层处集积更多的电子, n型半导体近表面层处的电阻随环境湿度的增加而下降。

2. 对n型半导体, 吸收系数 α 与电导率和折射率 n 成反比。

湿度增加使n型TiO₂的电导率增加, 则 α 随湿度的增加而减小。

且对酒精气体和温度都很灵敏, 有良好的耐磨性,

可能发展成为光纤传感器的多功能薄膜, 有较大的实用价值和展潜力。

6.4.4 新型界限电流式高温湿度传感器

传统的湿度传感器难对高温下湿度测定，

新型高温湿度敏感组件：当给 ZrO_2 固体电解质界限电流氧传感器施加1.4V以上电压时，在高温气氛下水分子的分解会导致与氧有关的界限电流的改变。

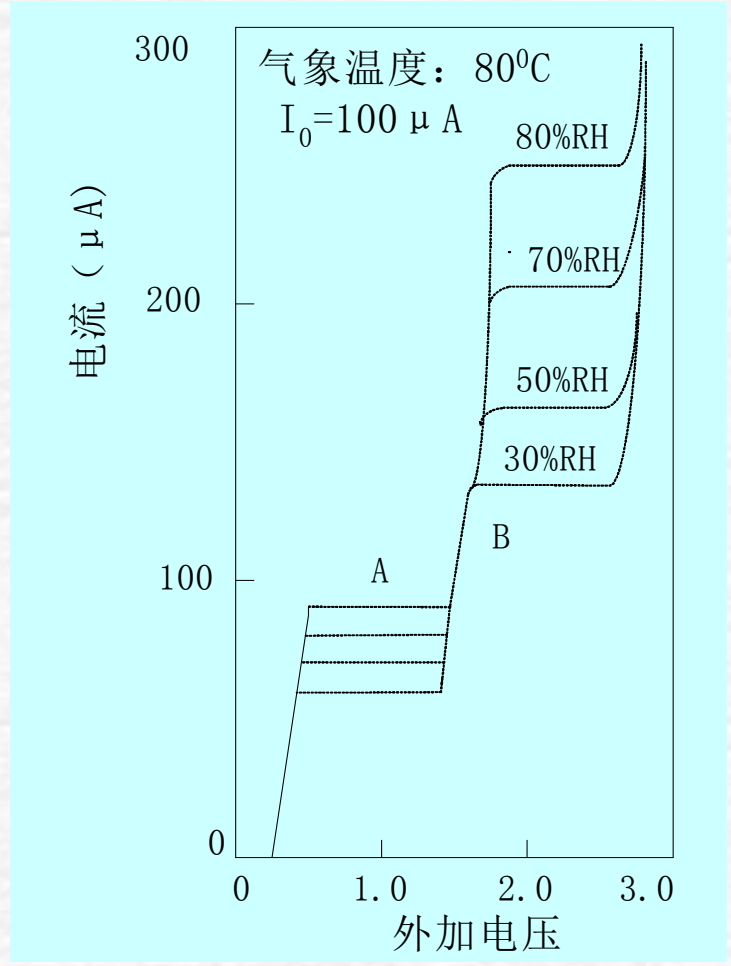
一、界限电流式湿度传感器的结构与工作原理

结构:同界限电流式 ZrO_2 氧敏元件的结构,

原理:阴极一侧所形成的极小孔洞对流入气体的限制作用,在**氧浓度一定**时输出电流不再随外加电压的增加而增大,达界限电流值。

置于**含水蒸汽的环境**中提高的工作电压,能测量到很显著的**第二界限电流值**。

随相对湿度变化的电流-电压特性图:



其在阴极与阳极的反应：



按照气体扩散孔限制Ficks法则，假定氧的扩散系数与水蒸汽的扩散系数相等下，第一界限电流 I_1 值与第二界限电流 I_2 值分别与氧分压和含有水蒸汽的氧分压成比例：

$$I_1 = [-4FDSP/(RTL)]\text{Ln}(1-P_{\text{O}_2}/P)$$

$$I_2 = [-4FDSP/(RTL)][1 + P_{\text{H}_2\text{O}}/(2P_{\text{O}_2})]$$

$$P_{\text{O}_2} = 0.21(P - P_{\text{H}_2\text{O}})$$

F为法拉第常数；D为混合气体分子的扩散系数；S为气体扩散孔的面积；P为混合气体总压强； P_{O_2} 是氧分压强； $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 是水蒸汽分压强；R是气体常数；T是绝对温度；L是气体扩散孔的长度；0.21为空气中氧气含量。

二、界限电流式湿度传感器的特性

干燥空气和含水蒸汽空气中特性曲线图：

干燥空气中 I_L 呈现一定的数值，而含水蒸汽的空气中则出现二段台阶，

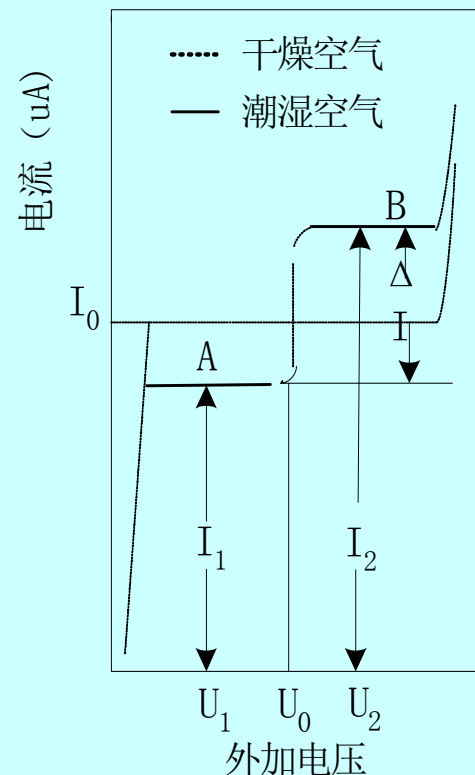
在区域A，由于水蒸汽存在，使环境气氛中的氧分压（浓度）减少，输出下降；

在区域B段，含有水蒸汽的空气中的 I_L 比在干燥空气中的 I_L 大。

∴环境中的水蒸汽在阴极上发生了前述的电解反应，产生了新的氧离子的缘故。

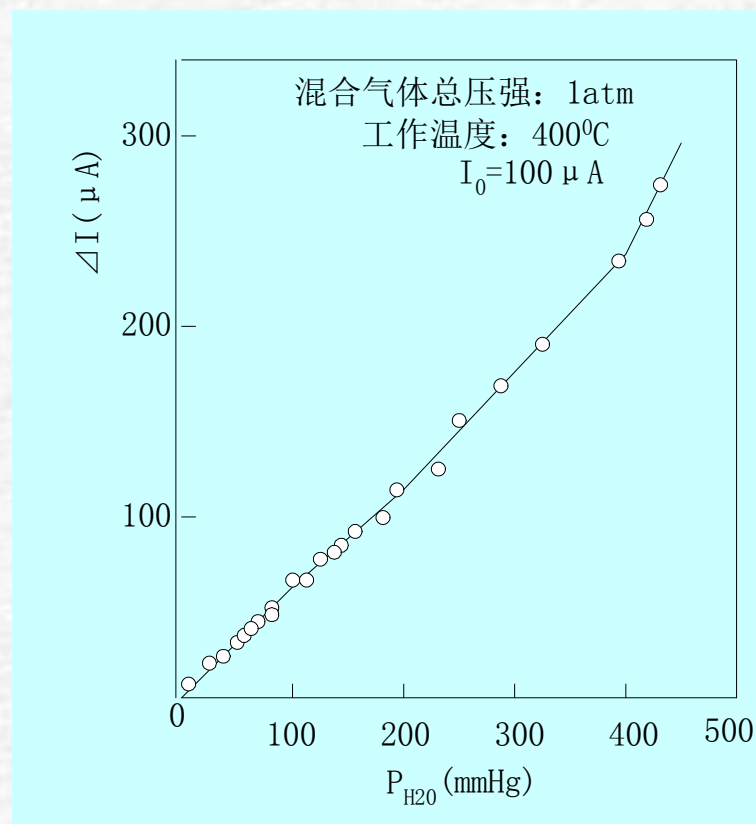
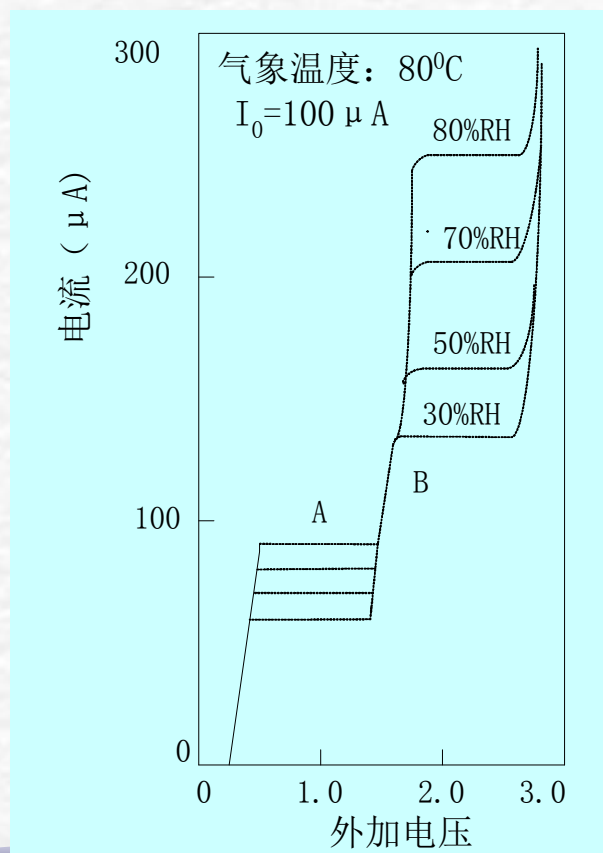
∴通过测量二段 I_L 的差值 ΔI ，可检测出相应的湿度值。

优点：在室温至100℃以上的温、湿度环境下工作，最高工作温度为400℃，具有优良的选择性和较长的使用寿命。



左图在环境温度为80℃，大气中的相对湿度变化时，传感器的电流与电压特性。随相对湿度的变化，A、B两段的临界电流值变化增大。

右图水蒸汽分压 P_{H_2O} 与 ΔI 的关系，一定范围几乎线性关系，测量精度可达满量程的±1%左右。



湿度传感器

6.1 概 述

6.2 电阻式湿度传感器

6.3 电容式湿度传感器

6.4 其它类型湿度传感器

6.5 湿度传感器的应用实例

6.5.1 湿度传感器在电路中的接口

6.5.2 湿度/电压转换电路

6.5.3 实用电路

不同环境的湿度测量应选用不同的传感器。如当温度在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 时可用**高分子湿度传感器**和**陶瓷湿度传感器**；在 $70\sim 100^{\circ}\text{C}$ 和超过 100°C 时用**陶瓷湿度传感器**。

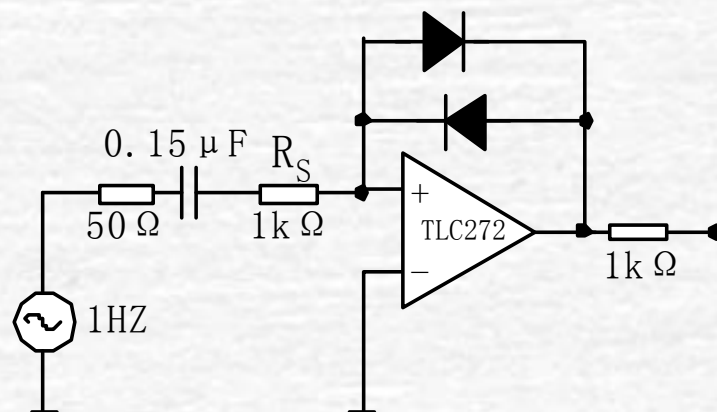
为使传感器准确稳定地工作，需附加自动加热清洗装置。下面介绍几种典型的应用实例。

一、连接方式

1. 对数变换电路

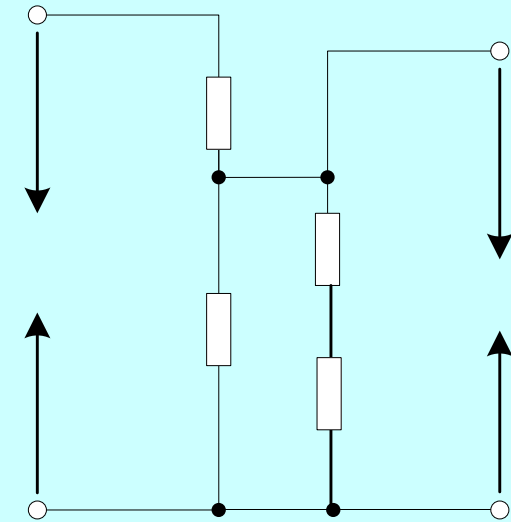
传感器 R_S 呈指数函数关系，可用二极管的电压-电流特性进行对数变换。

图为实际变换电路。运放TLC272的输出端接 $1\text{k}\Omega$ 的电阻用于防振。



适用于幅度变化范围较大的传感器，例如高分子湿度传感器，二极管的温度特性与湿度传感器的湿度特性相互补偿情况。

用电阻来改善线性



2. 电阻非线性校正方式

对电阻变化幅度较小的传感器，可将传感器与电阻串联连接（常用热敏电阻兼作温度补偿）来进行非线性校正，如图。

湿度传感器电阻 R_s 输出电压 V_{out} 变化可用电阻 R_A 、 R_B 和 R_C 使其线性化。

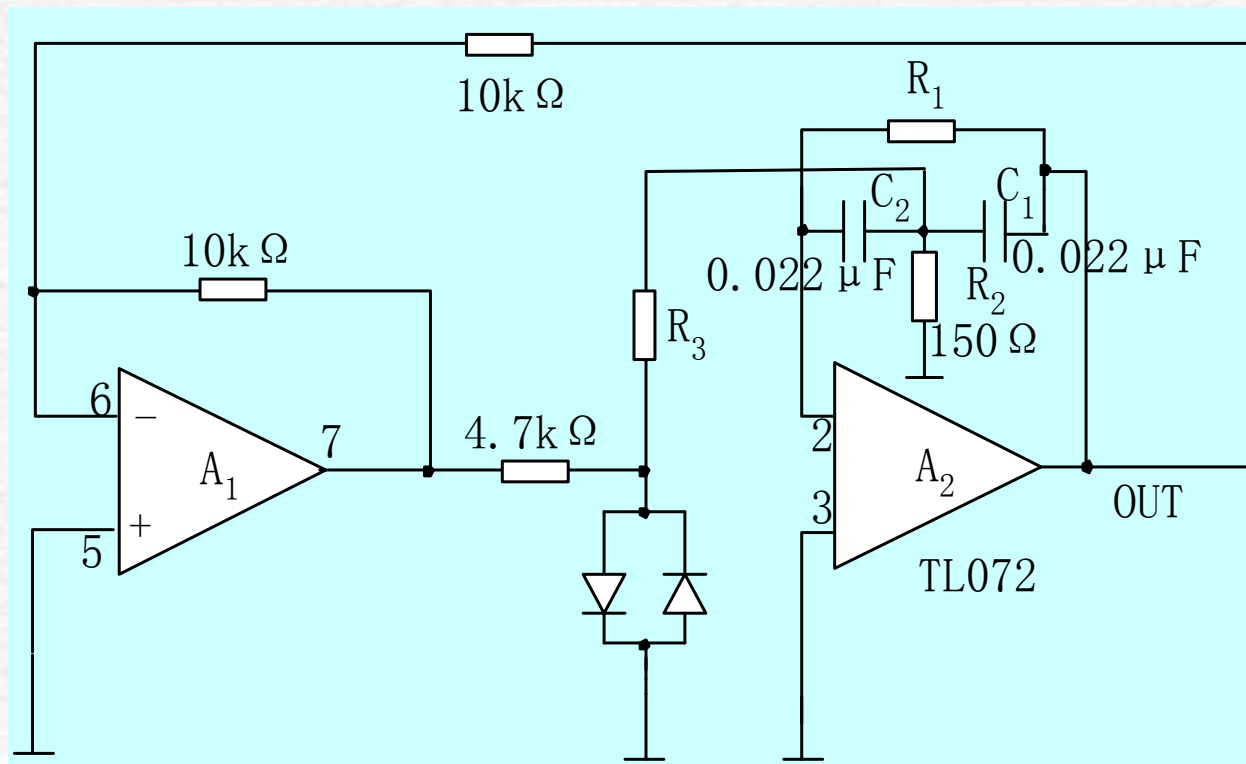
3. 其它方式

用相位检波方式减少噪声，扩大动态工作范围，把湿度电阻值变化转换为电压。

另外，将湿度传感器作为振荡电路中的一个组件，根据有无振荡与频率变化可求得相应的湿度。

二、信号源与信号处理

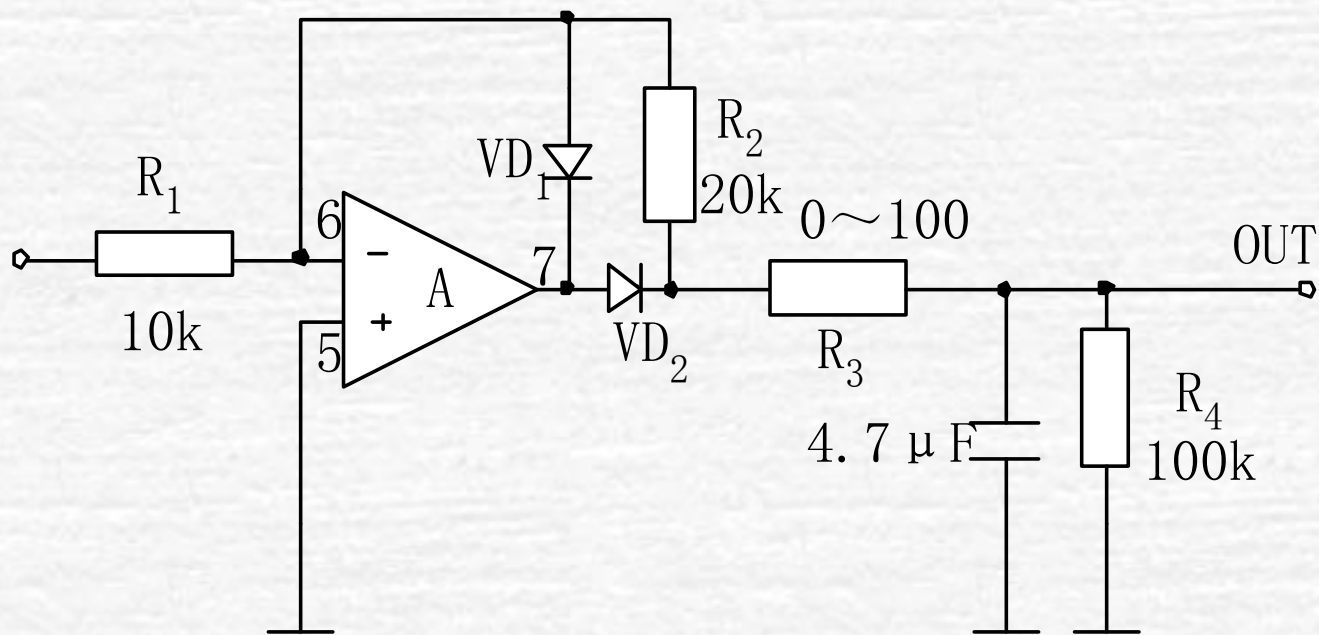
1. 信号源



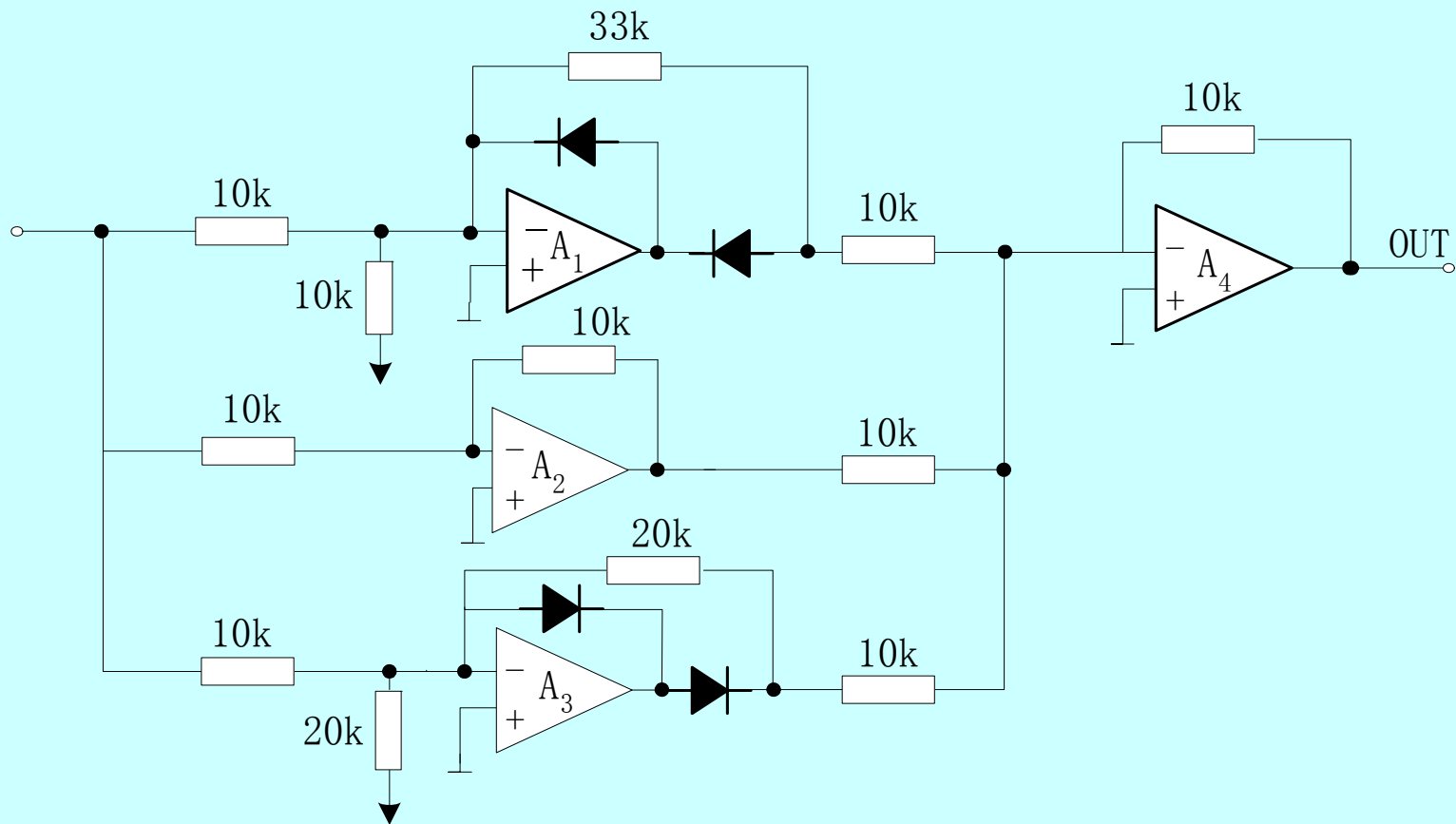
图为双T型振荡电路，改变电路中 R_2 或 C_1 与 C_2 ，就可改变振荡频率， R_3 用于改变振幅。

2. 交直流变换电路

采用交直流变换电路可把湿度变化转换为相应的直流电压变化，适用于中等湿度范围。在较低湿度时其变化率较小，在高湿度时会出现饱和状态，显然不是直线关系。



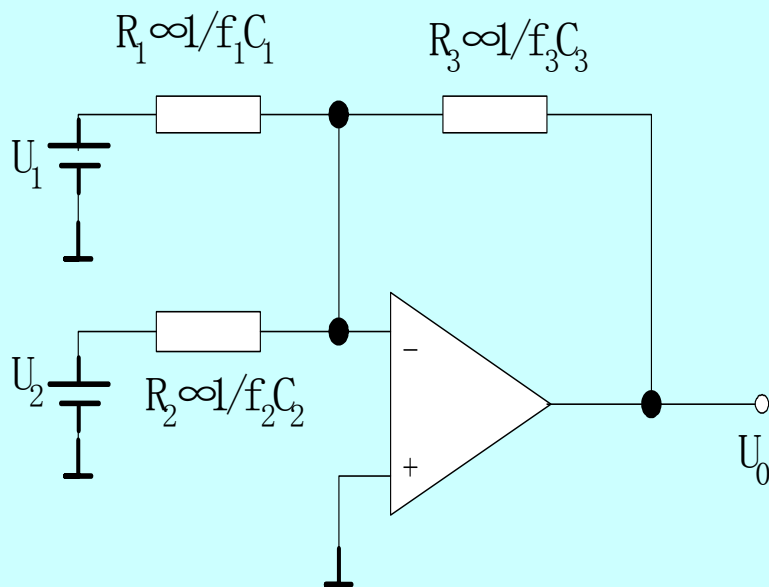
3. 折线近似电路



要采取放大倍数随输入值变化的放大电路，使其输出与输入关系为线性关系，如图。A₁、A₂、A₃、A₄都是LM324。

6.5.2 湿度/电压转换电路

1、简单的开关电容网络电路。湿度/电压转换原理电路图为一反相器，电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 用开关电容替代，等效电阻与时钟频率 f 和 C 乘积的倒数成比例，即为 $1/fC$ 。如果 $f_1=f_2=f_3=f$ ， $C_1=C_3$ ，则输出电压 U_0 为：

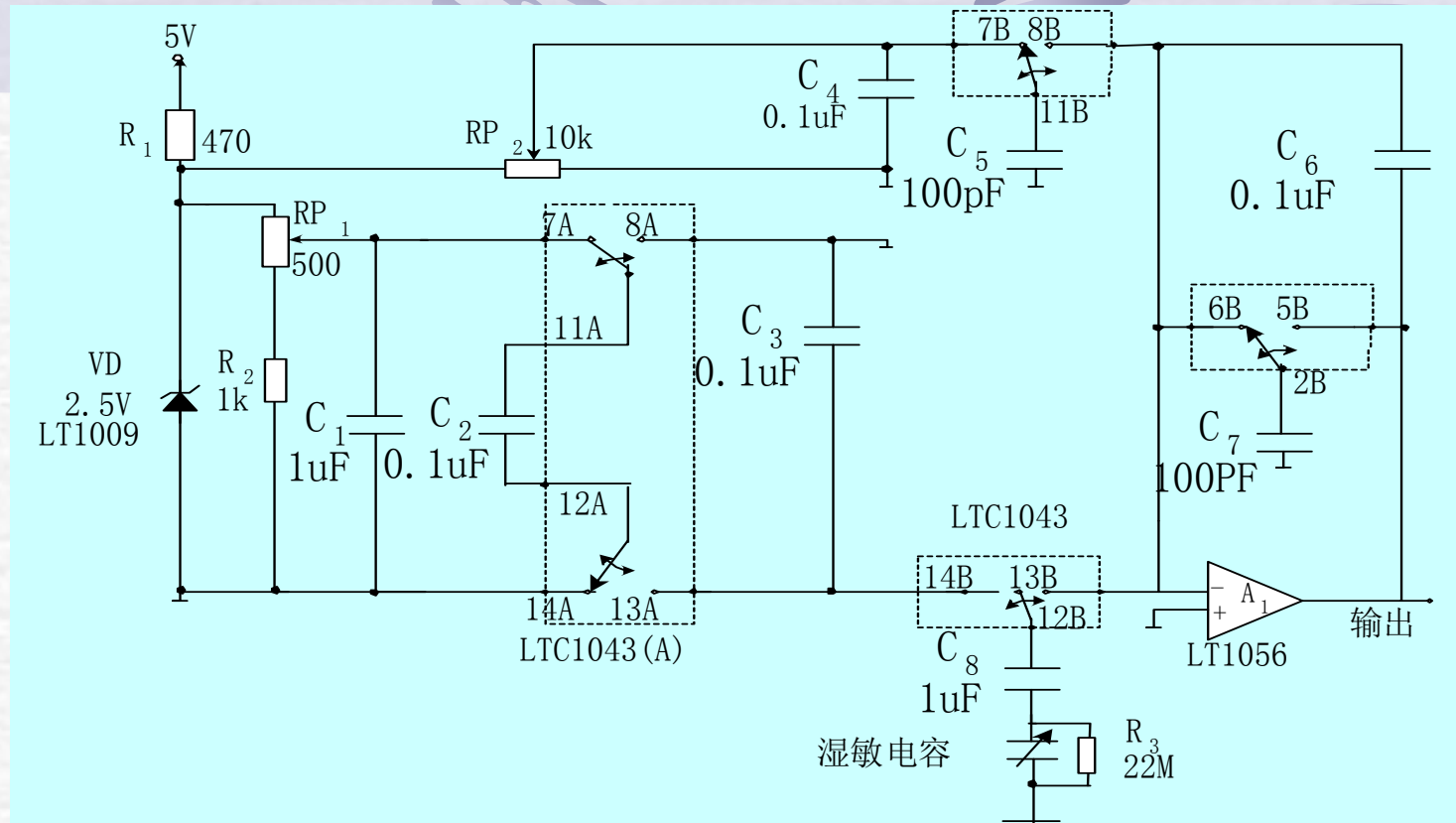


$$U_0 = -\frac{R_3}{R_1}U_1 + \frac{R_3}{R_2}U_2 = -U_1 + \frac{C_2}{C_3}U_2$$

若用湿敏电容替代 C_2 检测湿度，则 U_0 为 C_2 的单值增加函数。适当设定 U_1 值，当湿度为0%RH时可使 $U_0=0$ 。

2、湿度/电压转换实用电路

输出端可获得与相对湿度一对应的直流电压。调整如下：反复调整 RP_2 使5%RH时输出电压为0.05V，调整 RP_1 使90%RH时输出电压为0.9V。这样，对于湿度为0%~100%RH时输出电压为0~1V。

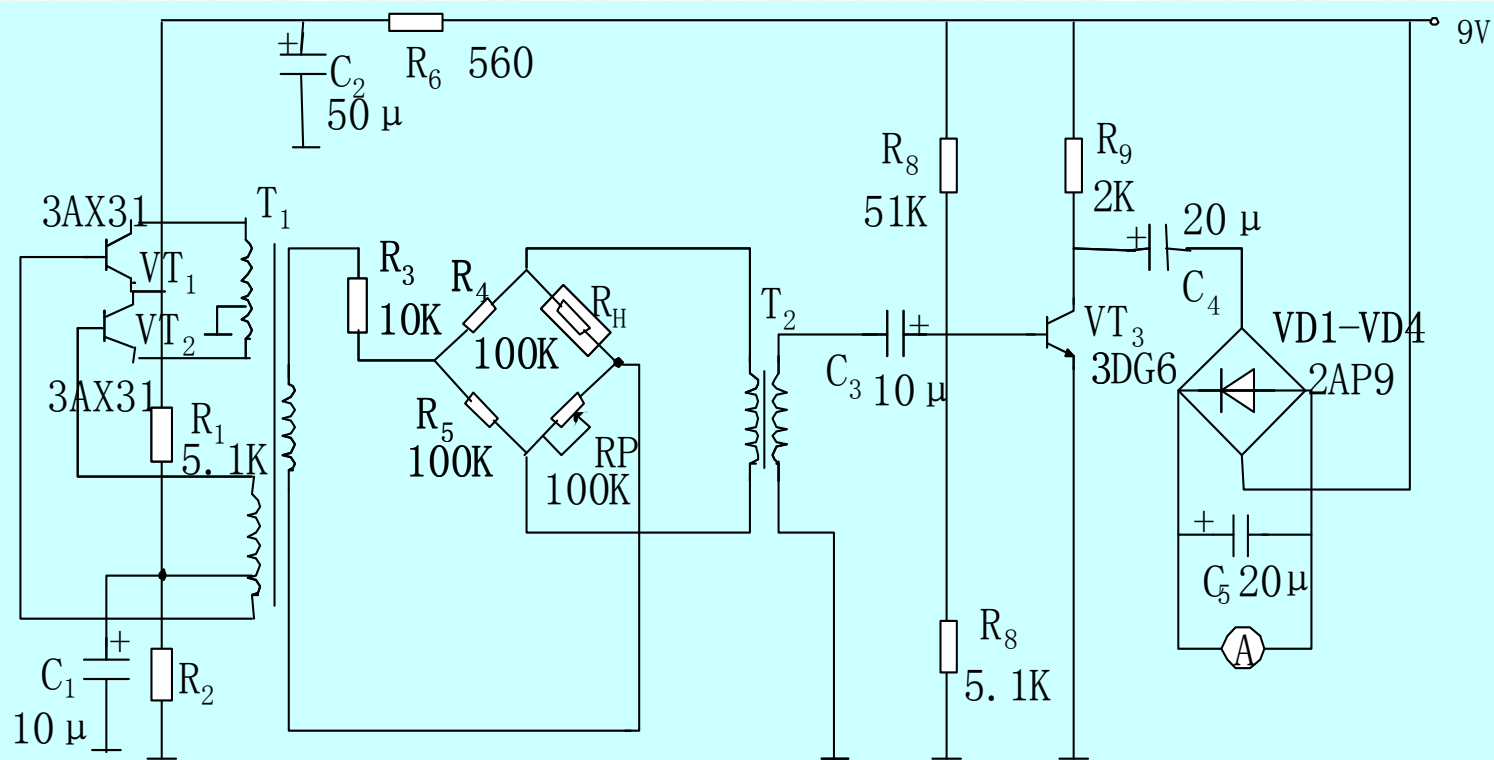


用VD获得2.5V的基准电压，用电阻分压获得相当于上图的电压 U_1 ，用A获得负电压 $-U_2$ 。当7A与11A，12A与13A脚短接时 C_2 进行充电，而8A与11A，12A与14A脚短接时 C_2 中充电电荷转移到 C_3 中，可获得相当于 $-U_0$ 的电压。7B、8B、11B脚与12B、13B、14B脚以及2B、5B、6B脚的各部分相当于上图中的 $R_1 \sim R_3$ 。相当于上图中的 C_1 是 C_5 ， C_3 是 C_7 ， C_2 是湿敏电容， $f_1 \sim f_3$ 都为150kHz。 C_8 为隔直电容， R_3 为放电电阻， C_6 为积分电容。

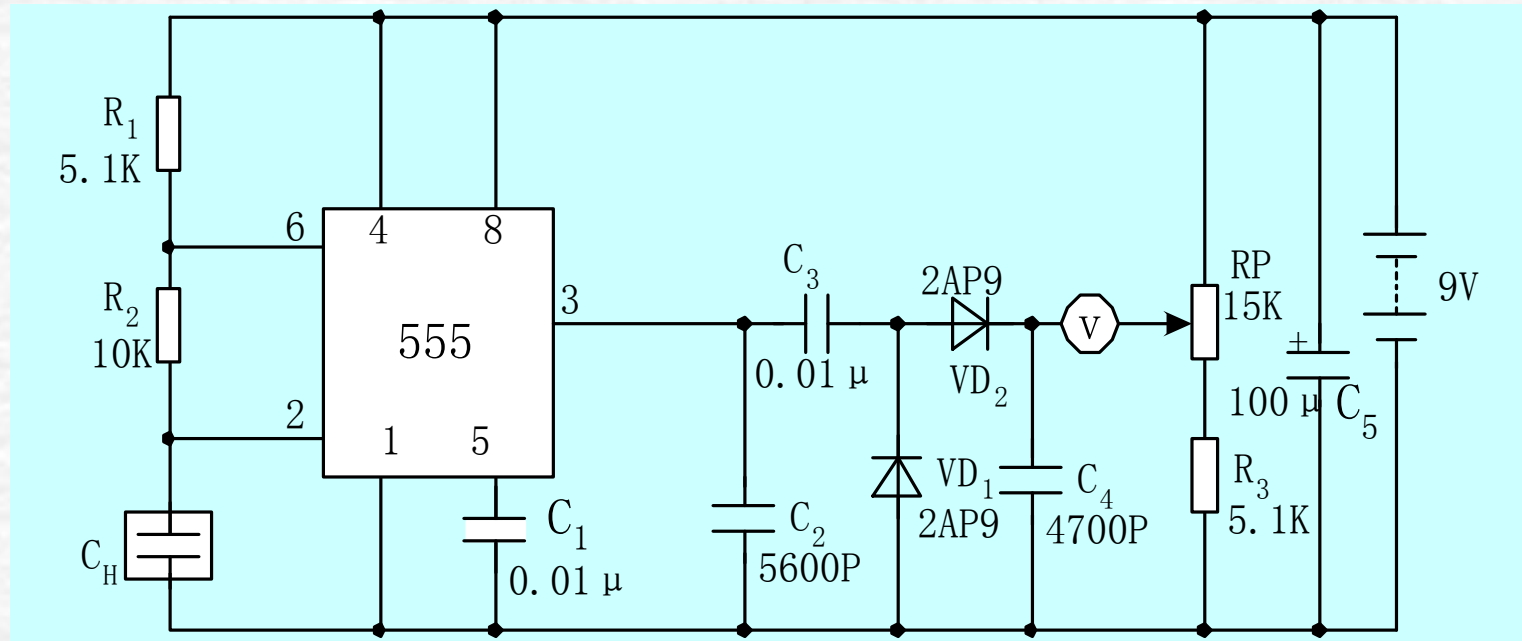
6.5.3 实用电路

一、直读式湿度计

R_H 为氯化锂湿度传感器，湿度增加阻值减小。由 VT_1 、 VT_2 、 T_1 等组成电桥电源（振荡频率为250~1000Hz）。电桥的输出经变压器 T_2 、 C_3 耦合到 VT_3 ，经 VT_3 放大后，通过 $VD_1 \sim VD_4$ 桥式整流，给微安表指示出由于相对湿度的变化引起电流的改变，把湿度刻划在微安表盘上成为直读式湿度计。



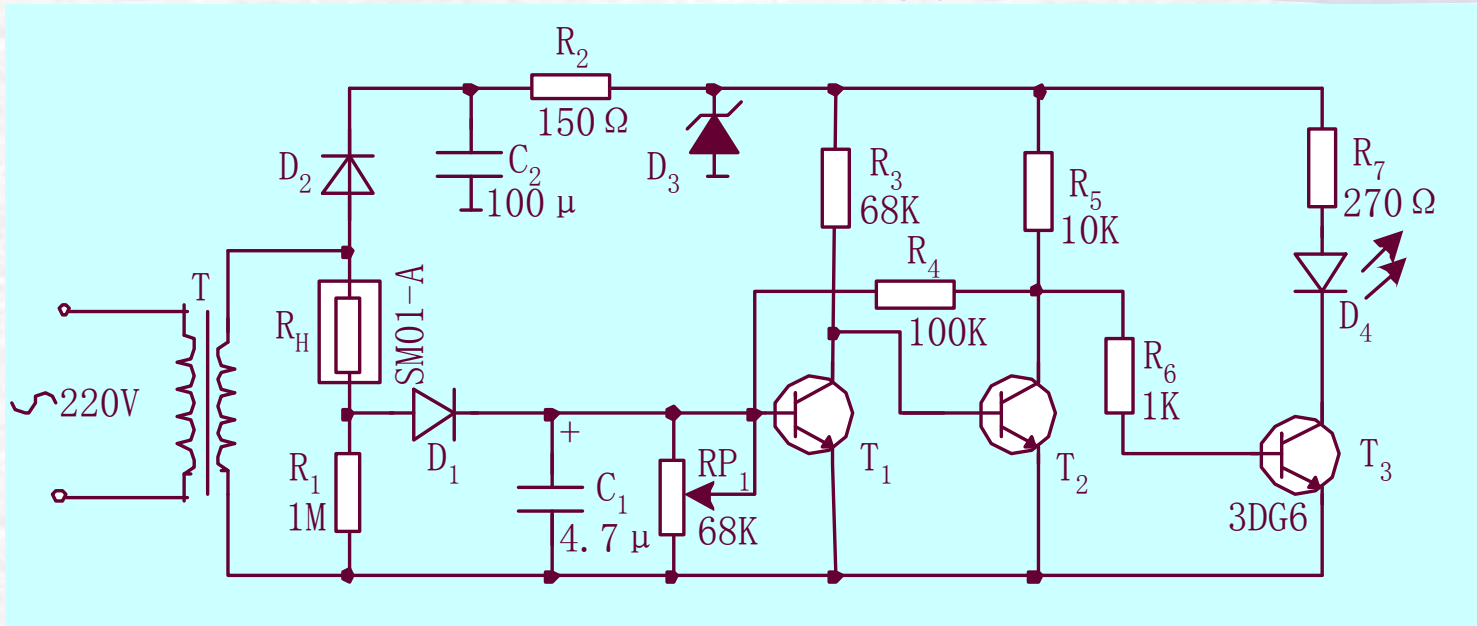
二、湿度检测器



图由555时基电路、湿度传感器 C_H 等组成多谐振荡器，输出端接有 C_2 将输出的方波信号变为三角波。

当相对湿度变化时 C_H 的电容量改变，输出的频率及三角波的幅度都发生相应的变化。输出的信号经 VD_1 、 VD_2 整流和 C_4 滤波后，可从电压表上直接读出相对湿度相应的值。RP电位器用于仪器的调零。

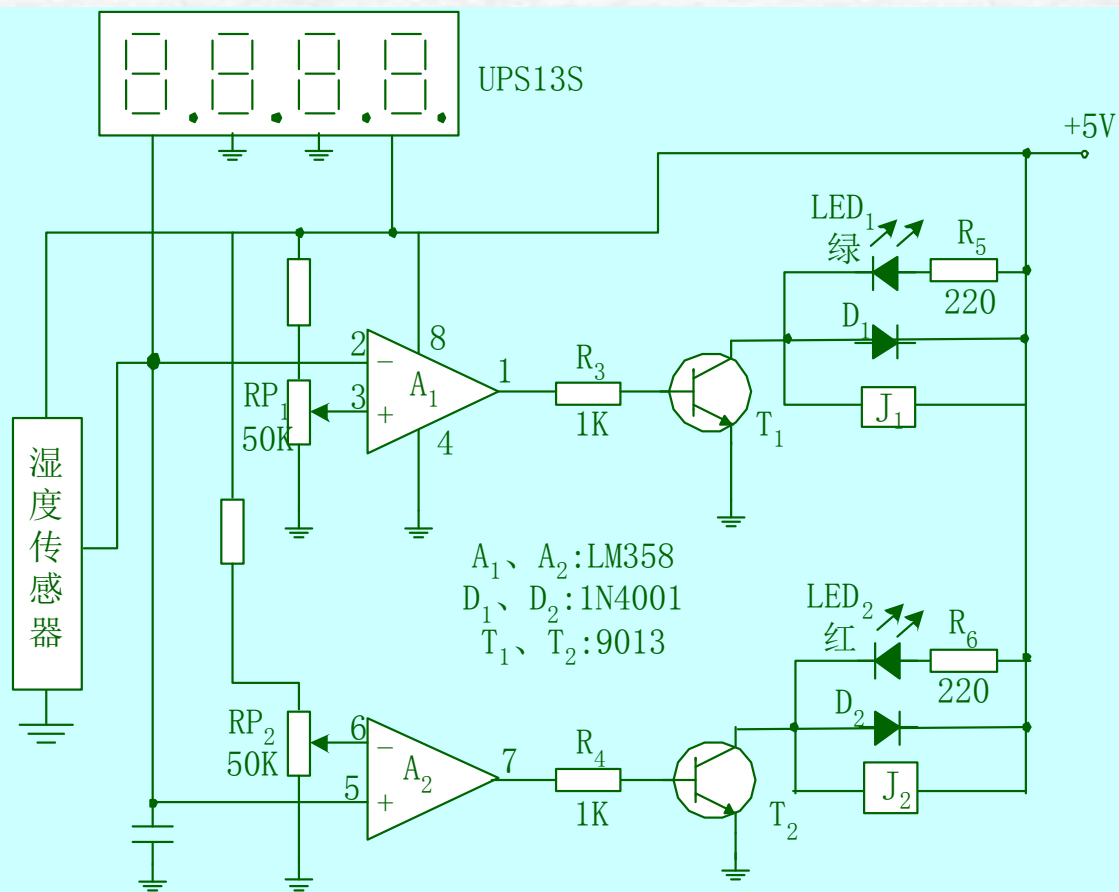
三、高湿度显示器



在环境相对湿度过高时作出显示。用MSOI—A型湿敏电阻，在20%~90%RH时阻值在几十千到几百欧内改变。变压器供给9V交流电压，当环境湿度增大时 R_H 减小， R_1 电压会升高，电压经 D_1 整流后加到由 T_1 、 T_2 施密特电路中使 T_1 导通、 T_2 止， T_3 通，发光 D_4 发光显示。

可应用于蔬菜大棚、粮棉仓库、花卉温室、医院等对湿度要求比较严格的场合。

四、房间湿度控制器

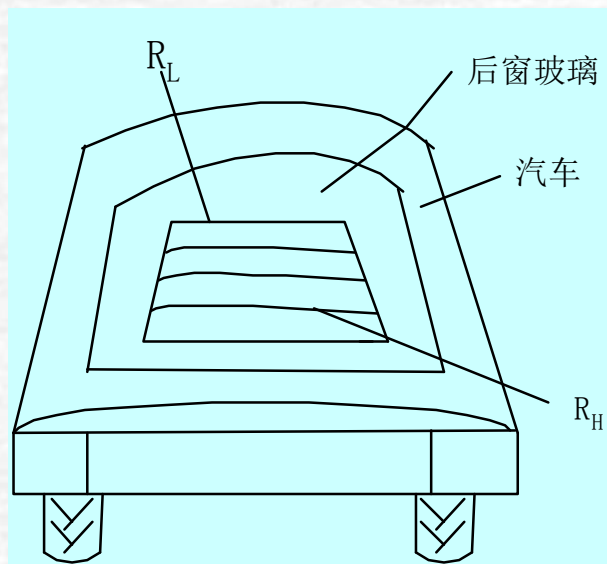


如图。将传感器的输出信号分别接在A₁、A₂和显示器的正输入端，A₁和A₂比较器由RP₁和RP₂调整。当湿度下降时输出电压下降，当降低到设定数值时A₁输出变为高电平，使T₁导通，LED₁发绿光表示空气干燥，J₁吸合接通超声波加湿器。当相对湿度上升时电压升高，

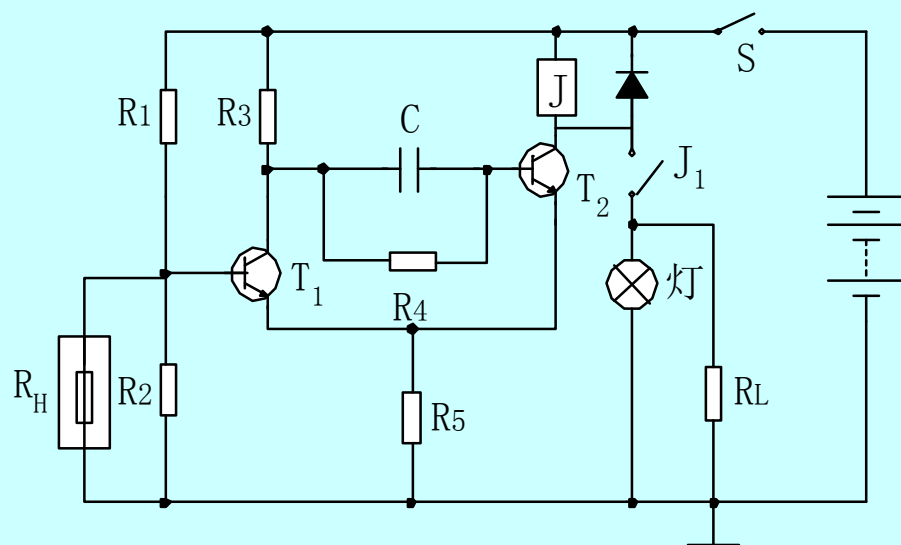
升到超过设定值时，J₁释放，A₂输出高电平使T₂导通，LED₂发红光表示空气太潮湿，J₂吸合接通排气扇排除潮气。相对湿度降到一定值时J₂释放排气扇停止工作。这样可以将室内湿度控制在一定范围内。

五、汽车后窗玻璃自动去湿装置

图中 R_L 为嵌入玻璃的加热电阻， R_H 为设置在后窗玻璃上的湿度传感器。由 T_1 和 T_2 接成施密特触发电路。在常温常湿条件下 R_H 较大， T_1 导通、 T_2 截止， J 不工作，加热电阻无电流流过。当室内外温差较大且湿度过大时 R_H 的阻值减小，使 T_1 处于截止， T_2 翻转为导通， J 工作， J_1 闭合，加热电阻开始加热，后窗玻璃上的潮气被驱散。



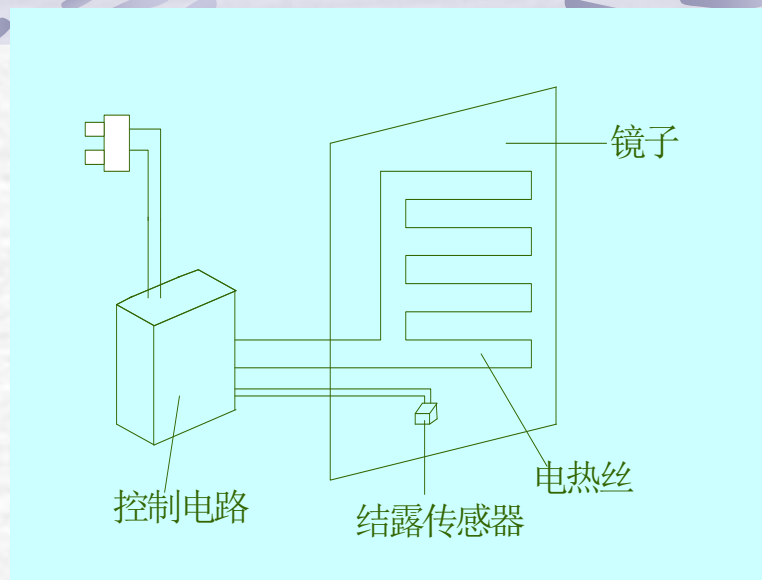
(a) 安装示意图



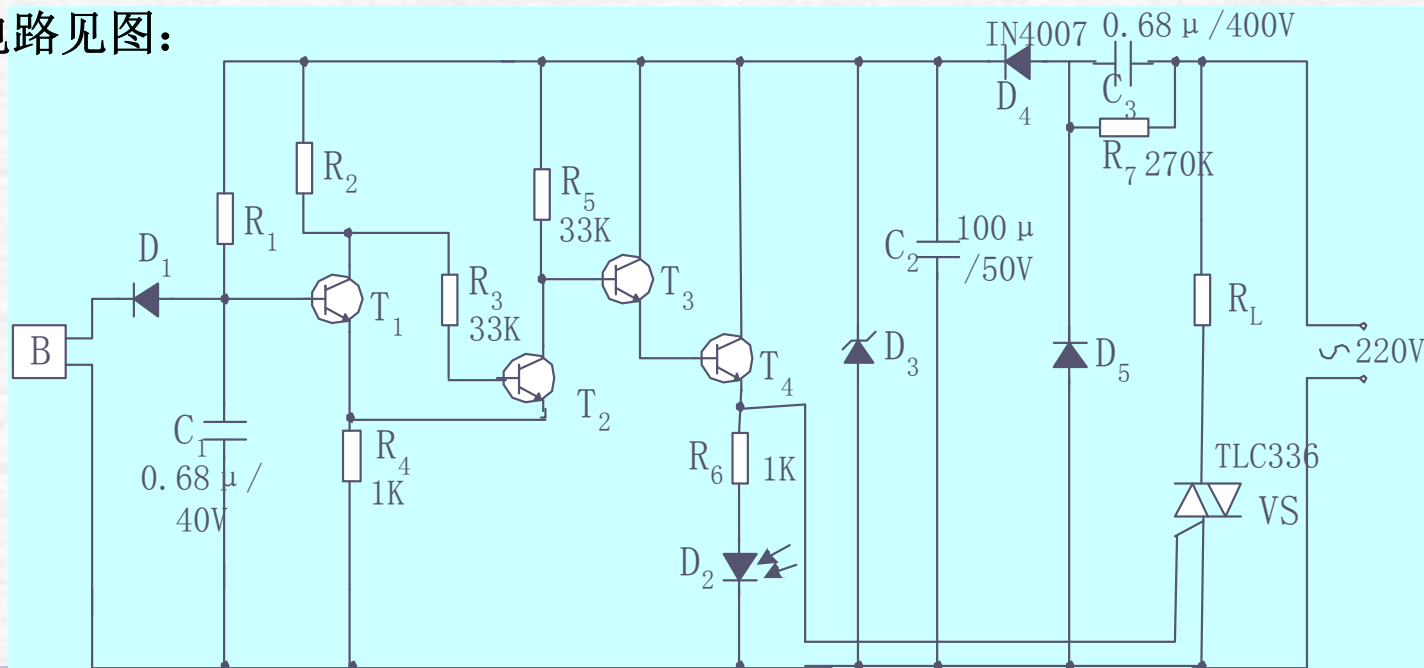
(b) 电路

六、浴室镜面水汽清除器

整体结构图：由**电热丝**、**结露传感器**（湿度增加阻值增加并有一个阈值湿度）、**控制电路**等组成，其中电热丝和结露传感器装在镜子背面，用导线将它们和控制电路联接。



控制电路见图：



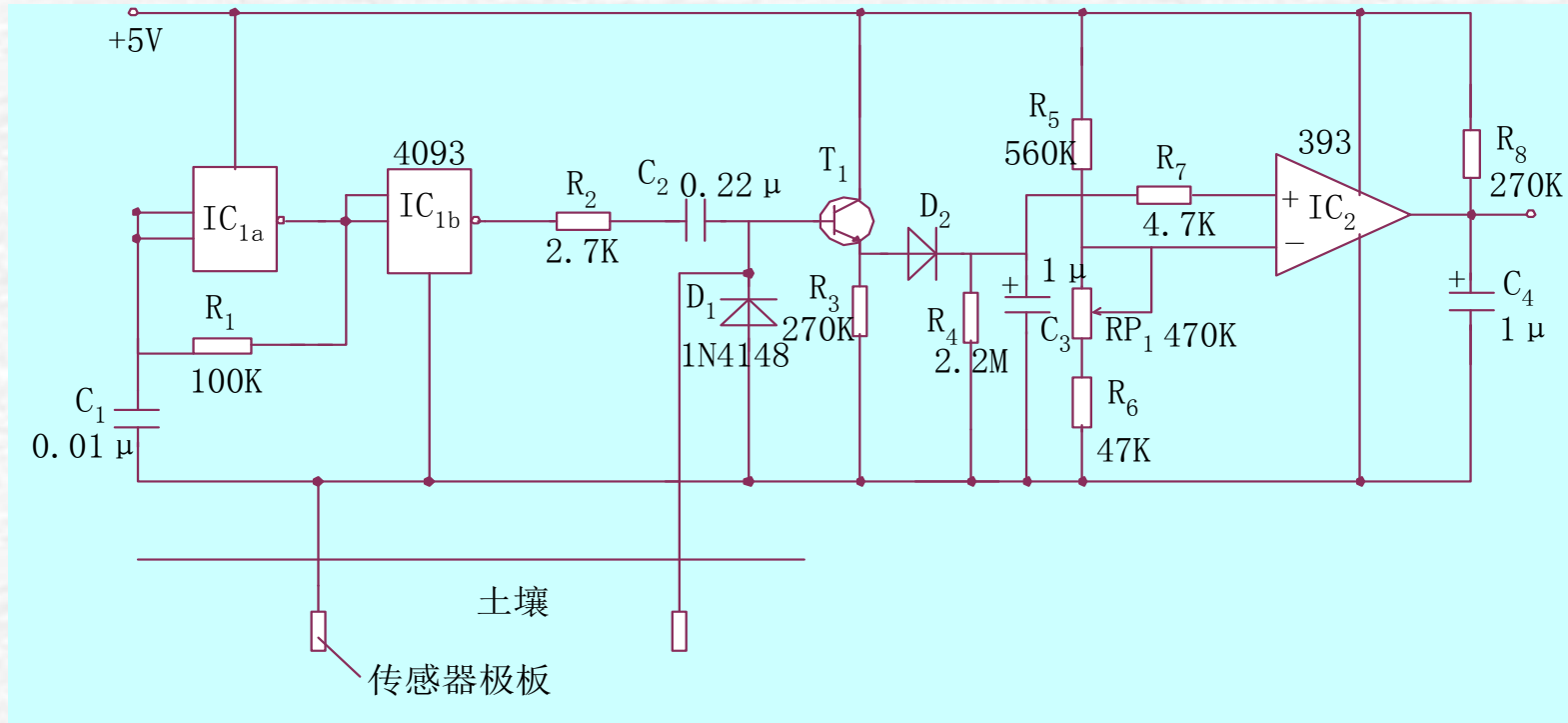
B为结露传感器，水汽阻值变化， T_1 、 T_2 施密特电路。

当镜面周围**空气湿度变低**时B阻值变小，约为 $2k\ \Omega$ ， T_1 的基极电位约 $0.5V$ ， T_2 通， T_3 和 T_4 截止，双向晶闸管VS的控制极无电流通过。

如果镜面的**湿度增加**，B阻值增大到 $50k\ \Omega$ 时， T_1 导通， T_2 止， T_3 、 T_4 均导通，VS控制极有控制电流导通，加热丝 R_L 使镜面加热。随镜面温度升高，水汽被蒸发恢复清晰。加热丝加热的同时指示灯 D_2 点亮。

调节 R_1 使加热丝在确定的相对湿度下开始加热。控制电路的电源由 C_3 降压，经整流、滤波和 VD_3 稳压后供给。

七、土壤缺水告知器

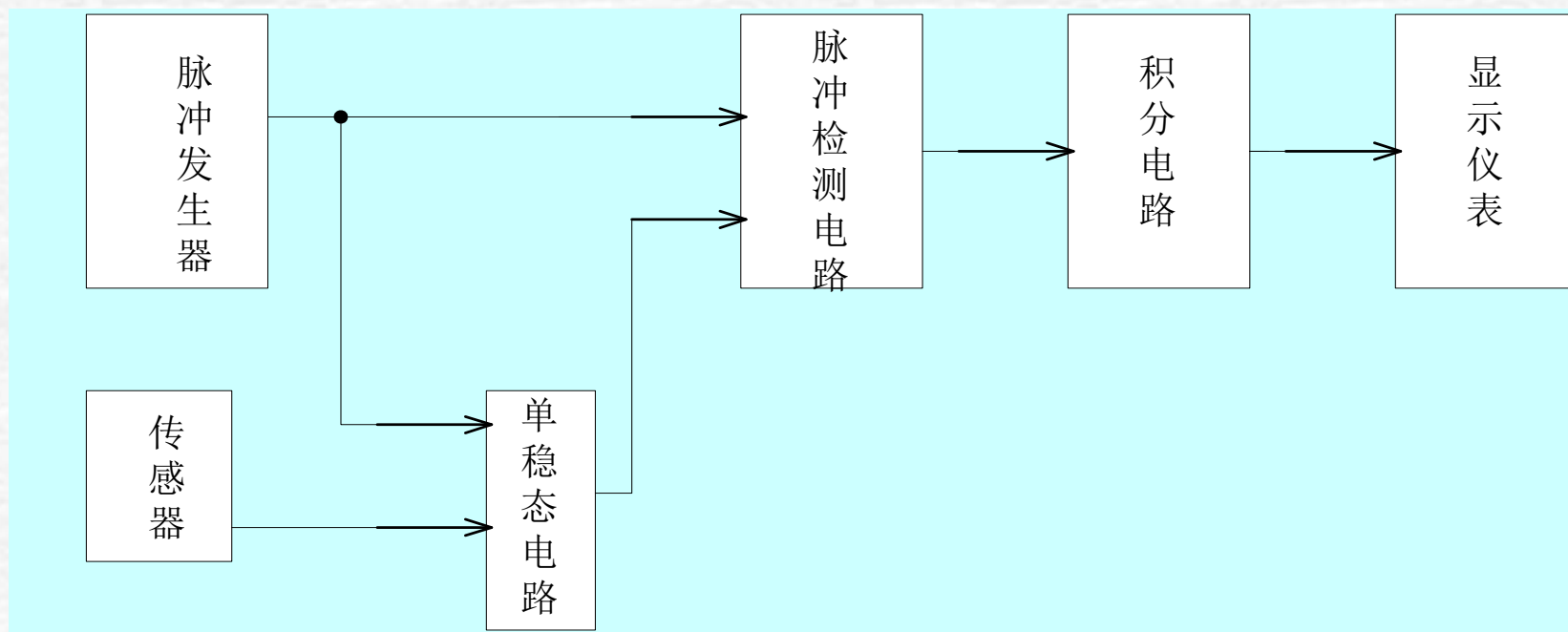


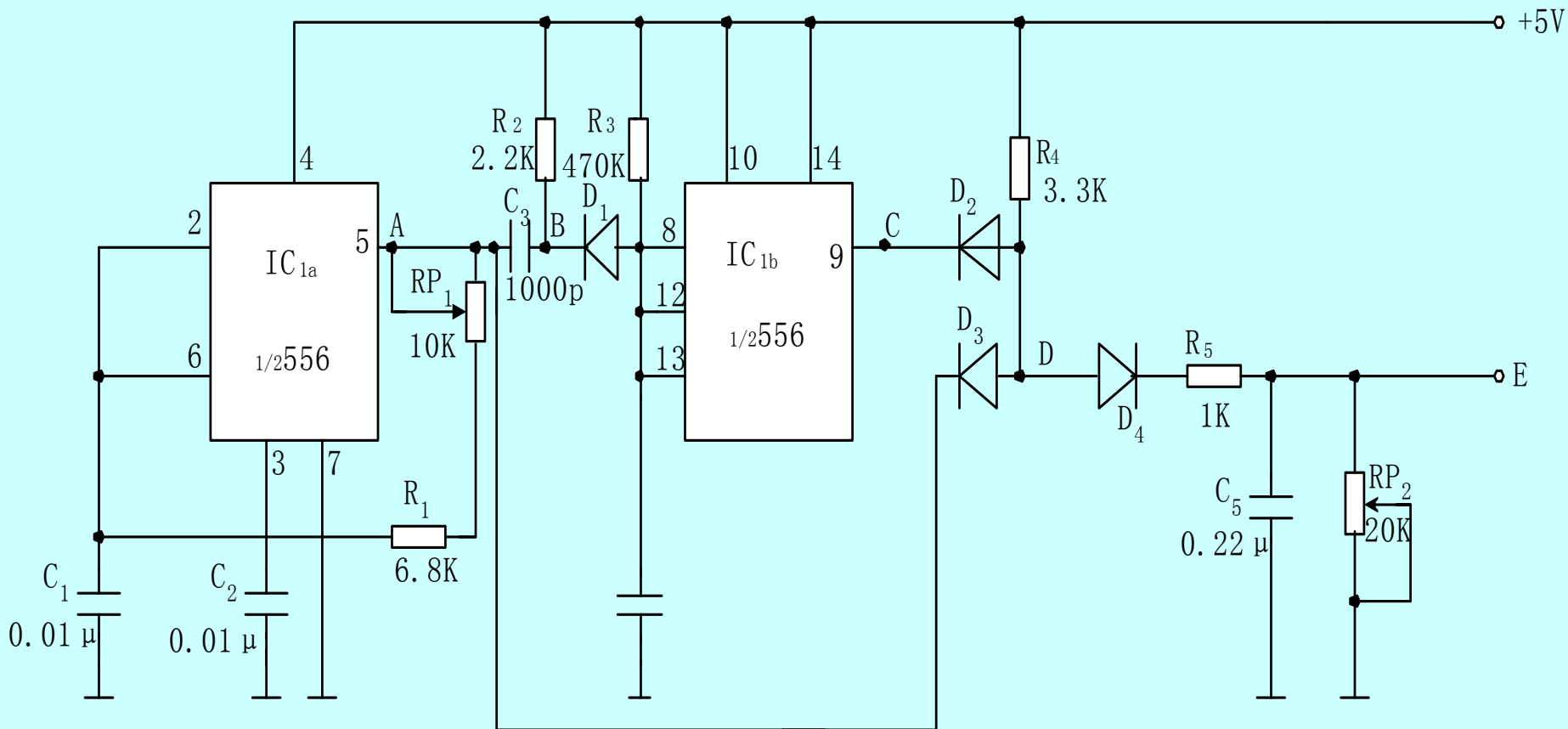
利用土壤电阻值的变化来判断土壤是否缺水。用一对金属探板为湿度传感器。采用交变信号:由 IC_{1a} 、 R_1 和 C_1 组成振荡器, IC_{1b} 为振荡器的缓冲电路。 R_2 与传感器测得电阻的分压由 D_1 削去负半部分, 经 T_1 缓冲并由 D_2 、 R_4 和 C_3 整流, 经 R_5 输送给 IC_2 比较器, 与 RP_1 设定电压比较。当土壤潮湿时其阻值变小, C_3 电压较低, 比较器 IC_2 输出电压 U_{out} 为低电位; 当土壤缺水干燥时 C_3 电压高于基准设定电压时, 比较器 IC_2 输出电压 U_{out} 为高电位。 U_{out} 可对土壤缺水指示报警电路进行控制。

八、电容式谷物水分测量仪

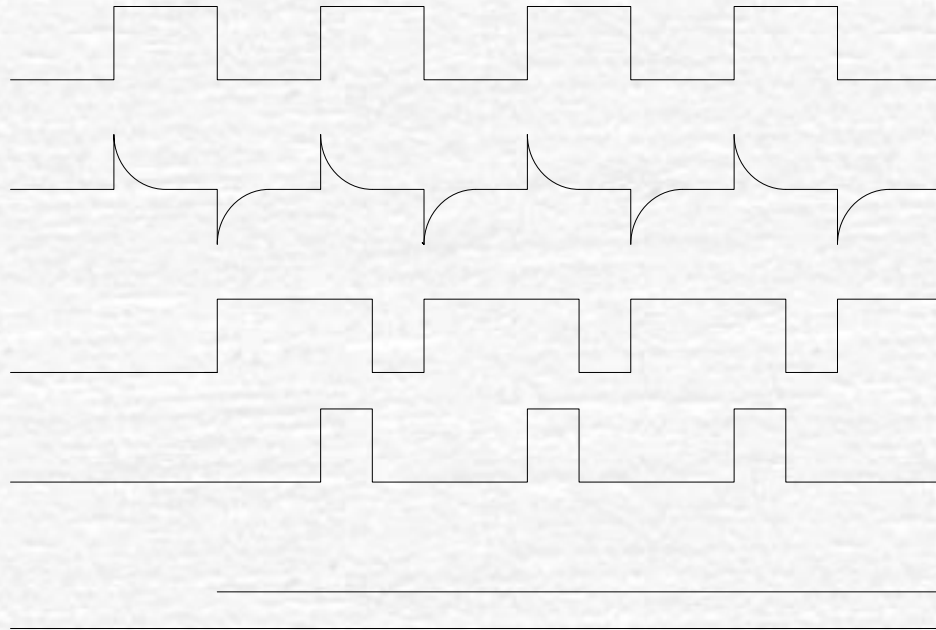
采用筒式电容式水分传感器，谷物装入传感器筒内后介电常数会随谷物水分含量不同而变化。


其中脉冲发生器和单稳态电路由时基电路555组成， IC_{1a} 组成占空比为50%，频率为8kHz的方波发生器，输出经 C_3 、 R_2 组成的微分电路输出尖脉冲。





尖脉冲经 D_1 去掉正向脉冲，由负脉冲触发 IC_{1b} 使单稳态电路翻转，单稳恢复的时间由 R_3 和传感器容量 C_H 决定。从 IC_{1b} 的9脚输出频率不变、脉冲宽度随 C_H 变化的矩形波(见图C波形)。从 IC_{1b} 的9脚输出的调宽方波和 IC_{1a} 5脚输出的方波输入到由 R_4 、 D_2 、 D_3 组成的与门，将两个波形中脉宽不同的部分检出(见图D)，经 D_4 隔离加到由 R_5 、 RP_2 、 C_5 等组成的积分电路，从E点输出与谷物水分对应的平均直流电压。





The End