

压电式传感器

压电式传感器是将压电元件承受的作用力转换成压电元件表面所带的电荷，这种特性称为压电元件的压电效应。具有压电效应的压电元件多是电介质。压电效应是可逆的，当沿着一定的方向对某些电介质施加作用力，使其产生变形时，则在固定的表面上产生电荷。当外力去掉后，元件又恢复不带电状态，此为正向压电效应。在电介质极化方向施加电场，这些电介质就在一定的方向上产生机械变形，当外加电场撤去时，变形又随之消失，此为逆压电效应。可见，压电元件的压电效应具有方向性和还原性。

压电传感器是典型的自发电式传感器，它还具有一定的可逆性，由于其体积小，重量轻，结构简单，灵敏度高，固有频率高，因而得到了广泛的应用。如压电电源、煤气灶的点火装置、超声波探头，还有治疗骨折的生物压电传感器等。压电元件是一种典型的力敏元件，可以测量最终能变换成力的物理量，如加速度、机械冲击、振动等。压电传感器无静态输出，只具有动态测量的特点，是一种广泛应用的传感器。

3.1 压电元件与压电效应

3.1.1 压电元件

具有压电效应的压电元件，它们的分子空间结构排列相当规则，这类材料是晶体，有单晶体与多晶体之分。

1. 单晶体

常用的单晶体压电材料是石英 (SiO_2)，其突出的优点是性能稳定，此外还具有动态响应好，机械强度高（可以测量高达 10^8Pa 的压力），线性范围宽等优点。但它的压电常数小，灵敏度低，适于测量较大的作用力。除石英材料外，在自然界中还发现了 20 多种单晶体材料都具有压电效应。

2. 多晶体

压电陶瓷是常用的多晶体压电材料，其中有钛酸钡 (BaTiO_3)、锆钛酸铅 (PZT) 和铌镁酸铅 (PMN)。PZT 是工业中应用较多的压电材料，有较高的压电常数，故灵敏度高。

3.1.2 压电效应

下面以单晶 SiO_2 (石英晶体) 为例, 介绍压电效应及产生原因。

图 3-1 是一个天然结构的石英晶体示意图。它是一个正六面体, 在晶体学中可以把它用三根相互垂直的轴来表示, 其中纵向轴 $Z-Z$ 轴称为光轴, 经过六面体棱线并垂直于光轴的 $X-X$ 轴称为电轴, 与电轴和光轴垂直的 $Y-Y$ 轴称为机械轴。通常把沿 $X-X$ 轴施加作用力产生电荷的压电效应称为“纵向压电效应”, 而把沿 $Y-Y$ 轴施加作用力产生电荷的压电效应称为“横向压电效应”, 沿 $Z-Z$ 轴施加作用力, 在压电元件的任何表面均无电荷产生。

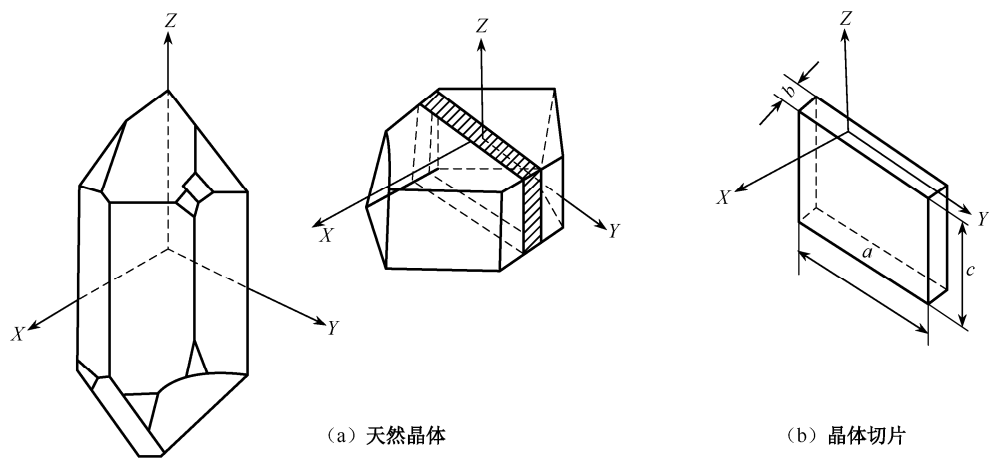


图 3-1 天然结构的石英晶体示意图

从晶体上沿着轴线切下的一片压电元件称为压电晶片, 当晶片在沿 X 轴方向有作用力 F_x 作用时, 会在与 X 轴方向垂直的表面产生电荷, 其大小为

$$q_x = d_{11} F_x \quad (\text{电荷极性由力的方向决定})$$

当晶片在沿 Y 轴方向有作用力 F_y 作用时, 会在与 Y 轴方向垂直的表面产生电荷, 其大小为

$$q_y = -d_{11} \frac{a}{b} F_y \quad (\text{电荷极性由力的方向决定})$$

从以上两式可以看出, 纵向压电效应与元件尺寸无关, 而横向压电效应与元件尺寸有关; 且从式中的负号可以看出, 两者产生电荷的极性相反。综上所述, 晶体切片上电荷的符号与受力方向的关系可用图 3-2 表示。

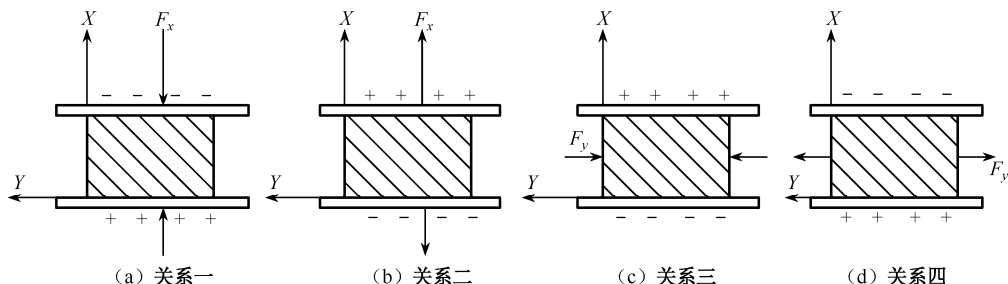


图 3-2 晶体切片上电荷符号与受力方向的关系

当压电元件上作用力消失时, 电荷亦随之消失。在压电材料的两种电荷产生的极面上,

如果加以交流电压,那么压电元件将会产生机械振动,即压电片在电极方向上具有伸缩现象,称为“电致伸缩现象”。这种现象与压电效应是相反的,故又称“逆压电效应”。

3.2 压电传感器的结构

压电传感器的被测量通常是作用力或能以某种途径将被测量转换成力的物理量。由于力的作用而在压电材料上产生的电荷,只有在无泄漏的情况下才能保存,即需要测量回路具有无限大的输入阻抗。这实际上是不可能的,因此压电传感器不能用于静态测量。压电材料在交变力的作用下,电荷可以不断补充,可以供给测量回路一定的电流,故适于动态测量。

在压电传感器中,压电材料通常采用两片或两片以上黏合在一起。因为电荷的极性关系,压电元件有串联和并联两种接法,如图3-3所示。图(a)为并联,适用于测量缓慢变化的信号,并以电荷为输出量;图(b)为串联,适用于测量电路有高输入阻抗,并以电压为输出量。

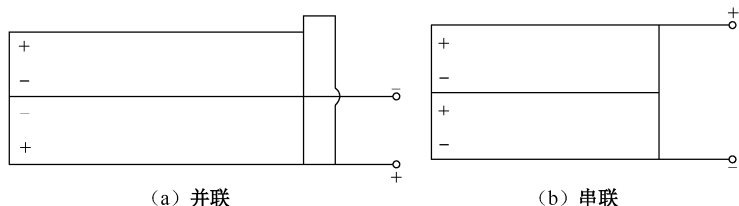


图 3-3 两压电片的连接方法

压电元件在传感器中,必须有一定的预紧力,以保证两片压电元件始终受到压力且感受到的作用力相同,保证输出电压(或电荷)与作用力成线性关系。同时,预紧力又不能太大,否则,会影响灵敏度。

3.3 压电传感器测量电路

3.3.1 压电传感器的等效电路

压电片在受力时,会在电极表面出现电荷,其中一个极板呈现正电荷;另一个极板呈现负电荷,两者电荷量相等,极性相反。

当两极板上聚集电荷,极板中间为绝缘体时,可将其视为一个电容器,其电容量为

$$C = \frac{\varepsilon S}{h} (\text{F})$$

式中, S 为极板面积; h 为压电片厚度; ε 为压电材料的介电常数,随材料的不同而不同。由于两极板极性各异,在两极板之间呈现电压,其值为

$$U = \frac{q}{C}$$

因此常常把压电传感器等效为一个电源 ($U = \frac{q}{C}$) 和一个电容器 C 组成的串联电路。压

电元件等效电路如图 3-4 所示。从图中可以看出, 只有当外电路(负载)无穷大, 且内部也无漏电时, 外力所产生的电荷才能够长期保存。当外电路负载不是无穷大, 电路会以时间常数 $R_{LZ}C$ 按指数规律放电。

如果把压电传感器与测量仪表连在一起时, 应考虑连接电缆的等效电容。压电传感器完整的等效电路如图 3-5 所示。其中, C_a 是传感器电容, R_a 是传感器漏电阻, C_c 是电缆电容, C_i , R_i 是放大器输入电容和电阻。

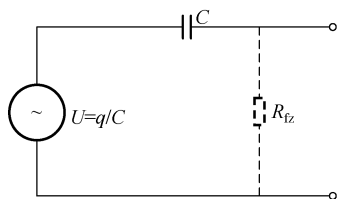


图 3-4 压电元件等效电路

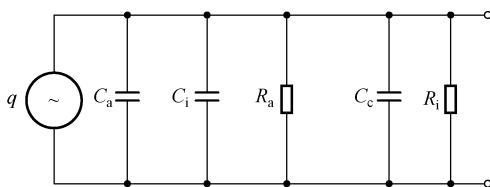


图 3-5 压电传感器完整等效电路

3.3.2 测量电路

压电传感器本身的内阻抗很高, 而输出的电荷又非常微弱, 因此传感器对测量电路有两个要求: 放大作用和阻抗变换作用, 即将压电传感器的高输出阻抗变换成低输出阻抗, 这就需要使用前置放大器。压电传感器的输出可以是电压, 也可以是电荷, 因此常用的前置放大器主要有电压放大器和电荷放大器两种类型。

1. 电压放大器

一般情况下, 电压源要求前置放大器的电压灵敏度不随工作频率降低, 将 R_a 与 R_i , C_c 与 C_i 并联, 得出

$$R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i} \quad C = C_c + C_i$$

压电传感器的开路电压 U 与其产生的电荷 q 和其本身的电容量 C 有关, 即 $U = \frac{q}{C_a}$, 当 $\omega R(C_a + C_c + C_i) \gg 1$ 时, 放大器输入电压幅值为

$$U_{\text{srn}} = \frac{dF_m}{C_a + C_c + C_i}$$

式中, U_{srn} 为输入电压的最大值; F_m 为作用力的最大值。

由上式可以发现, 当改变连接传感器与前置放大器的电缆长度时, C_c 将改变, 放大器输入电压 U_{sr} 也随之变化, 从而使前置放大器的输出电压 $U_{\text{sc}} = AU_{\text{sr}}$ 发生变化 (A 为前置放大器的增益)。因此, 传感器与前置放大器组合系统的输出电压和电缆电容有关。在设计时, 常常把电缆长度定为一个常值; 在实际使用时, 如果改变电缆长度, 则应当重新校正其灵敏度, 否则由于电容电缆的改变, 将会导致误差的产生。

图 3-6 是具有前置放大功能的电压放大器。图中 VT_1 是 MOS 型场效应管, 构成源极输出器, 第二级是锗管构成的对输入端的电压负反馈, 提高输入阻抗, 降低输出阻抗。 R_1, R_2 是 VT_1 的偏置电阻, R_3 是一个 $100M\Omega$ 的电阻, 可以提高输入阻抗。 R_5 是 VT_1 的漏极电阻,

其数值可以根据漏极电流的大小确定。 R_4 是 VT_1 的源极接地电阻,也是 VT_2 的负载电阻, R_4 上的交流电压经 C_2 反馈到输入端,提高 A 点电位,使 R_3 两端电位接近,更加提高了输入阻抗。二极管 VD_1 是保护场效应管,同时在温度变化时,利用二极管的反相电流随温度变化进行温度补偿。 R_6 是限流电阻,使稳压管工作在稳压区。这个电路实际上是起了一个阻抗变换的作用。

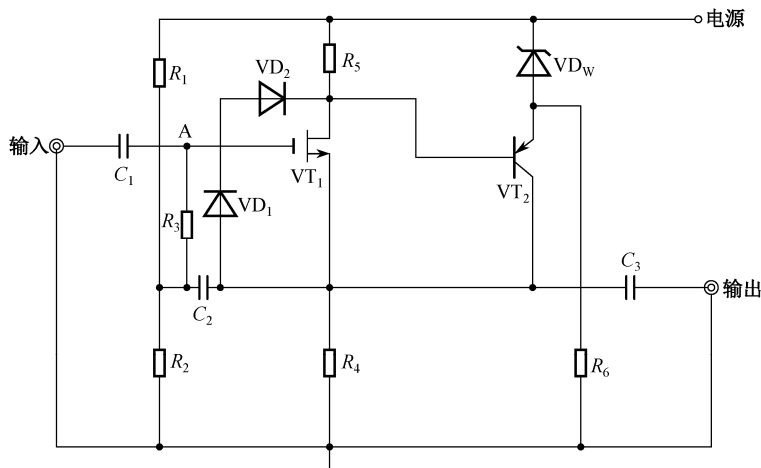


图 3-6 具有前置放大功能的电压放大器

2. 电荷放大器

电荷放大器是一个具有反馈电容的高增益运算放大器,如果忽略 R_i , 等效电路如图 3-7 所示。图中 U_o 为放大器输出电压,其大小为

$$U_o = \frac{qA}{C_a + C_c + C_i - C_f(A-1)} = U_{sr}A$$

若 $A \gg 1$, $C_f A \gg C_a + C_c + C_i$, 则有

$$U_o \approx \left| \frac{q}{C_f} \right| \quad U_{sr} \approx \left| \frac{q}{C_f A} \right|$$

由上式可以发现,在电荷放大器中, U_o 与电缆电容无关,而与 q 成正比。这就是电荷放大器的特点。

如图 3-8 为具有前置放大功能的电荷放大器实用电路。 VT_1 是场效应管,进行阻抗变换。 VT_2 是普通三极管组成的共射级放大电路。集电极引出的四个电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 组成分压器,以供给 VT_1 适当的偏压,用负反馈稳定直流工作点。 C_1 是旁路电容,使交流信号不反馈, C_f 是反馈电容。

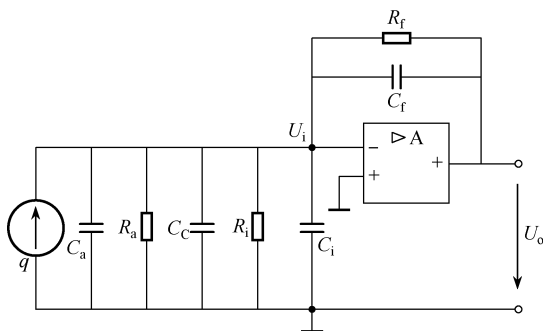


图 3-7 电荷放大器等效电路

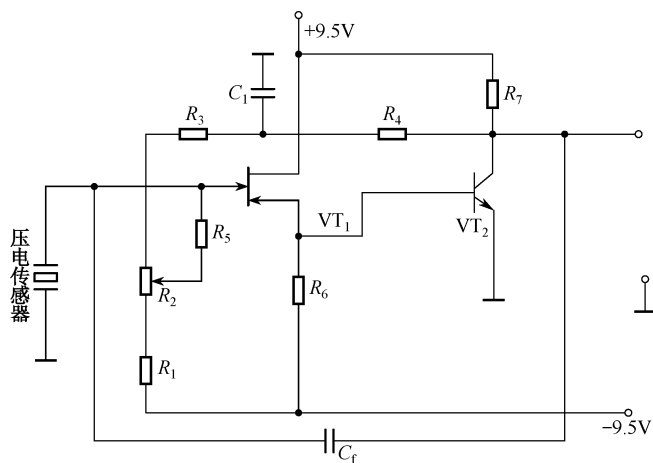


图 3-8 具有前置放大功能的电荷放大器实用电路

3.4 应用举例

3.4.1 压力传感器及电路

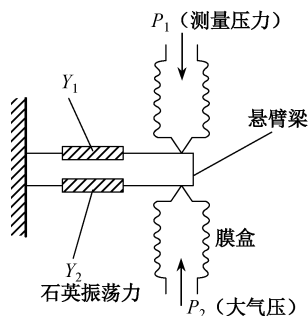
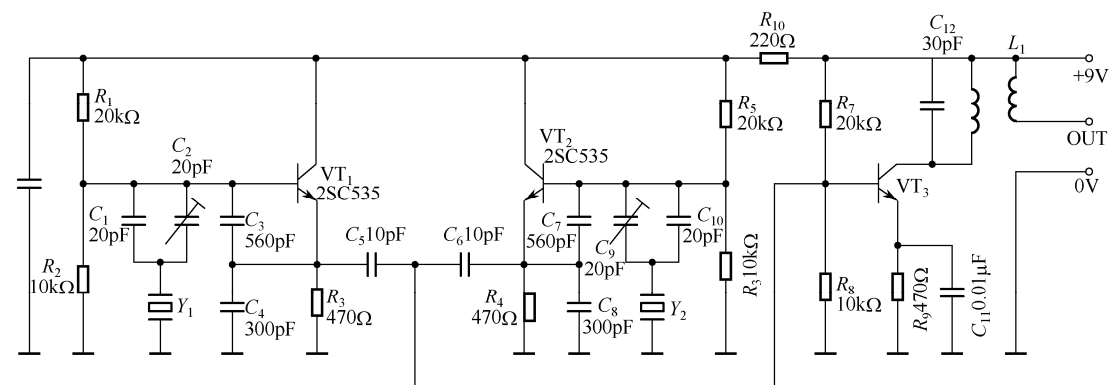


图 3-9 石英压力传感器结构原理图

压力传感器用于流体压力计、水位计、加速度计、倾斜仪等。石英压力传感器的结构原理如图 3-9 所示。在平行于石英振子的表面加力，作用力按一比例关系转换成石英的振荡频率，通过传感器，以两石英的振荡频率差作为输出。该传感器可以测量振动频率达 10Hz 的作用力。

图 3-10 是石英压力传感器的测量电路。VT₁ 与 VT₂ 组成差动放大电路，在被测差压为零时，经差动放大电路的发射极输出电流为零，再经 VT₃ 转换成零电压输出。若被测量不为零，输出电压就反映了被测压力。



了被测压力。

图 3-10 石英压力传感器测量电路图

3.4.2 压电加速度传感器及电路

加速度传感器是利用质量块将加速度转换成作用力，在压电元件上产生电荷输出。图 3-11 是压电加速度传感器结构原理图。传感器在感受被测加速度时，通过传感器中的质量块转换成作用在压电元件上的作用力，同时质量块又起预紧力的作用。目前，对加速度的测量已有专用的传感器如 TA-25、国产的 5511 型传感器，这类传感器主要用于振动加速度的测量。如 TA-25，它的性能参数如下：

- 测量范围： $(\pm 1 \sim \pm 10) \text{ g}$ ；
- 分辨率： $5 \times 10^{-6} \text{ g}$ ；
- 输出电压： $(1 \sim 5) \text{ V/g}$ ；
- 电源电压： $\pm 15 \text{ V}$ ($\pm 20\%$)。

图 3-12 是一种振动加速度传感器的测量电路。电路中, 利用传感器将被测加速度转换成电压输出, 经过运放 741 和阻容元件组成的二阶低通滤波器将 53Hz 以上的振荡频率衰减, 再经 IC₂ (3521) 和阻容元件组成的高通滤波器滤去低于 1Hz 的振荡频率。IC₃ 与 IC₄ 组成交流放大积分器, 可以将 IC₂ 的输出转换成速度输出。IC₅ 与 IC₆ 又可以将速度积分成位移输出。由于加速度、速度、位移幅度的不同, 为了都能送至同一片 MC14433 做 A/D 转换, 电路中配备了未标阻值的三个串联分压器, 可以根据需要设计选择。图中 IC₇ 是反相器。

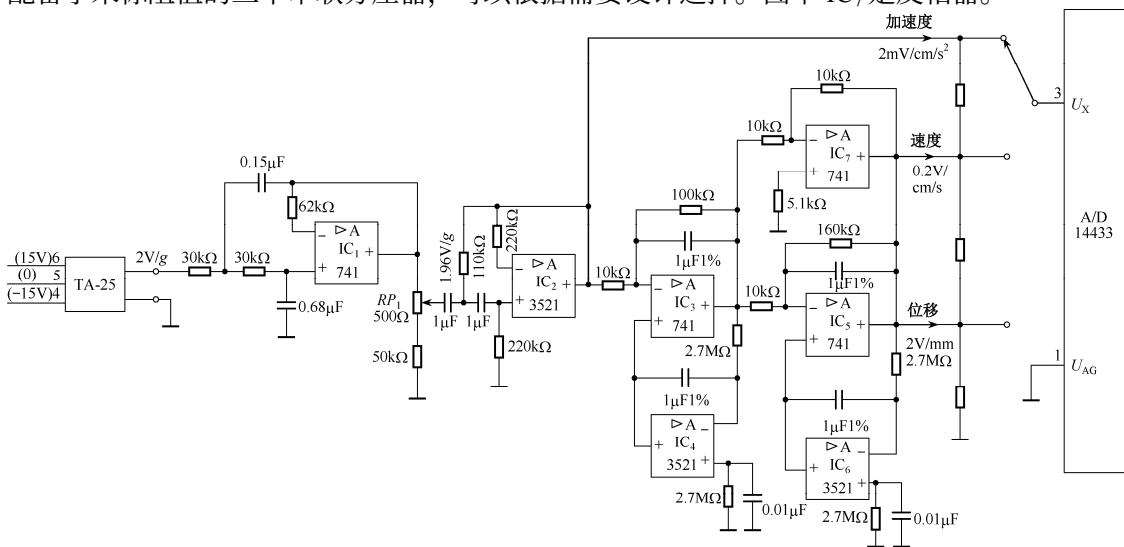


图 3-12 振动加速度传感器测量电路图

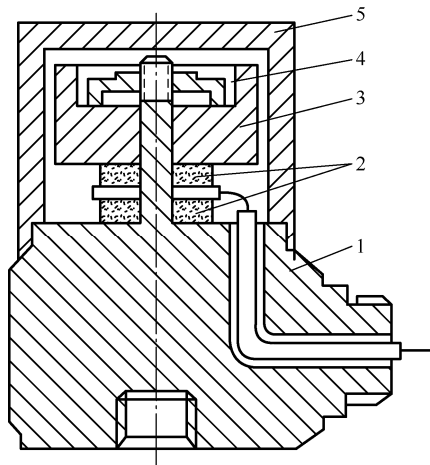


图 3-11 压电加速度传感器结构原理图

1—基座；2—压电片；3—质量块；4—弹簧；5—壳体

3.4.3

用气压表监测大气压力，对于预报天气具有重要的意义。传统的气压计是玻璃管式的气压表，在使用之前，需要调节刻度盘指针位置，经较长时间才能测量出气压的变化，而且由于机械磨擦的影响，会带来很大的测量误差。这里介绍的电子气压计，是用压电片作为压力传感器，用发光二极管随时自动显示大气压力及变化趋势。该电子气压计传感器内部结构如图 3-13 所示。

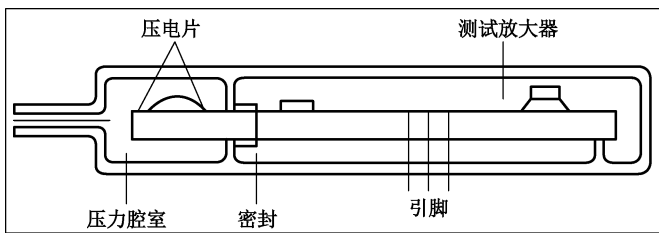


图 3-13 电子气压计传感器内部结构

这种传感器采用 Bosch 公司生产的 HS20 型压电式传感器, 在图 3-14 的电子气压计测试电路中, 在传感器芯片的①, ③脚加上合适的电压 (如+5V), 当压电片受到大气压力作用时, 由传感器的②脚输出与大气压力成正比的直流电压, 并且传感器内部有温度补偿电路, 环境温度的变化对测量结果无影响。

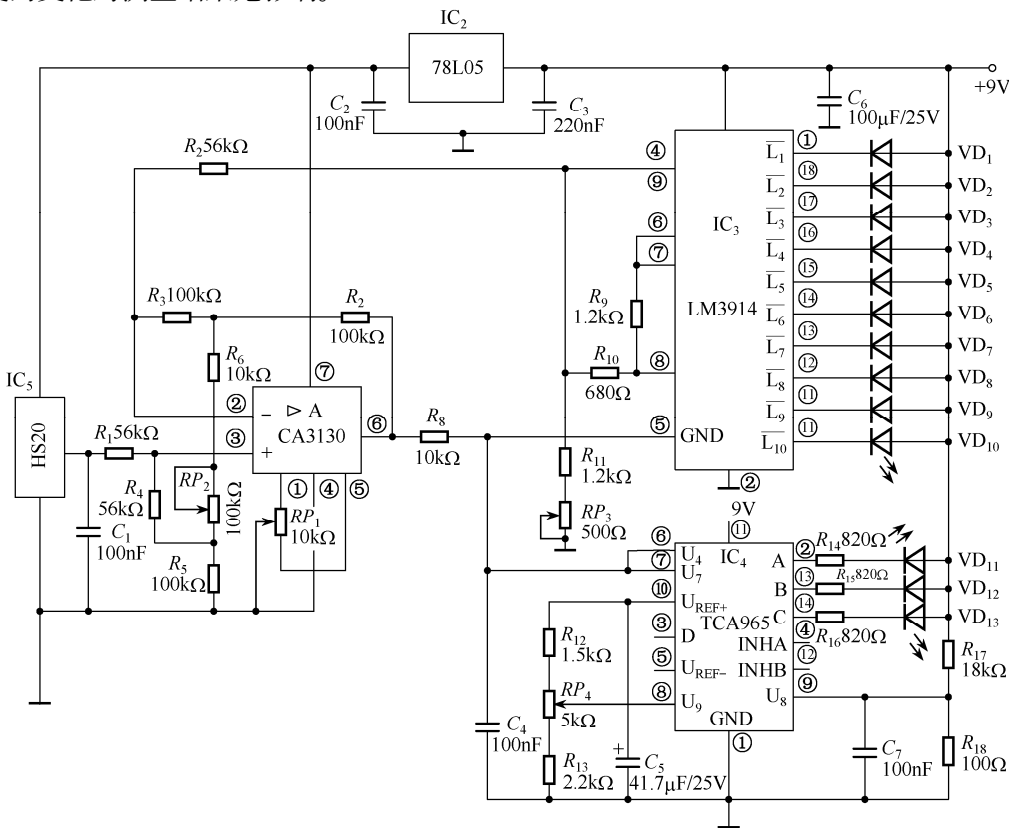


图 3-14 电子气压计的测试电路

测量电路中,传感器的输出经高输入阻抗放大器 CA3130 放大,其中 RP_1 可调整失调电

压, RP_2 调节该放大器的放大倍数。放大器的输出接入 IC_3 , IC_3 是由 LM3914 驱动器组成的 LED 驱动电路, 它的输出端 $L_1 \sim L_{10}$ 分别接有指示气压值的 10 只发光二极管。发光二极管的亮、灭由 LM3914 的⑤脚输入的电平高低来决定。LM3914 的内部具有稳定的电压基准, 与⑤脚输入的直流电压相比较, 保证测量的准确性。这个基准电压还通过 R_2 加到 CA3130 的反相输入端, 为它提供稳定的电压基准。此外, IC_3 通过内部的恒流源驱动发光二极管, 故 $VD_1 \sim VD_{10}$ 无需串接限流电阻。 IC_4 TCA965 为窗口鉴别器, 它与发光二极管 $VD_{11} \sim VD_{13}$ 组成气压变化趋向指示电路。 RP_4 可调节窗口电平, 若气压稳定, VD_{12} 点亮, 气压降低, VD_{13} 点亮, 气压升高, VD_{11} 点亮。电路中 78L05 是集成稳压器, 为 HS20 提供稳定的 5V 电源电压。



思考题

- 3.1 什么是压电效应? 压电效应的特点是什么? 以石英晶体为例, 说明压电元件是怎样产生压电效应的?
- 3.2 压电传感器为什么只适用于动态测量?
- 3.3 压电传感器的结构中, 为什么要有施加预紧力的装置?
- 3.4 压电传感器为什么要接前置放大电路? 常用的前置放大电路有几种? 各有什么特点?
- 3.5 试用压电传感器设计一个黏度计, 画出结构原理图, 说明测量过程以及工作原理。