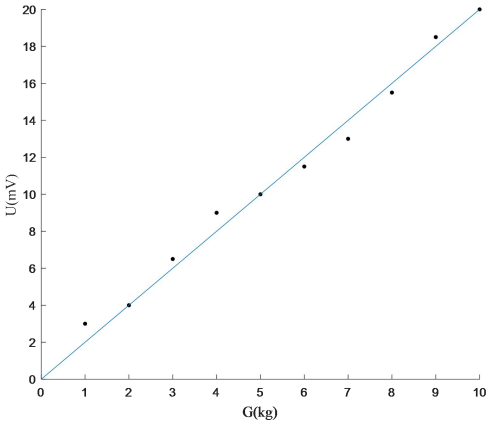


(一) (本题共 18 分) (1) 请导出电阻式传感器的微分表达式, 通过该式说明能够实现哪几种电阻式的传感器 (3 分)? (2) 选择其中一种最适合的电阻式传感器设计一个电子秤, 画出你所设计的传感器结构并解释设计理由 (3 分)。(3) 画出该电子秤的检测电路, 连同你设计的传感器, 一并说明该测量系统的工作过程 (5 分)。(4) 假设该电子秤的满量程 10Kg, 测得数据如下表和图所示, 请计算出该电子秤的灵敏度、最大绝对误差和满度相对误差, 并指出该电子秤的精度级别 (4 分)。(5) 假设图中的直线为拟合后直线, 请问一般采用何种方法进行数据的线性处理, 写出其数学表达式 (3 分)。

题（一）表

重量 (Kg)	3	4	6.5	9	10	11.5	13	15.5	18.5	20
输出电压 (mV)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	



题（一）图

答：

(1) 电阻式传感器微分表达式： $\partial R = \frac{R}{l} \partial l - \frac{R}{A} \partial A + \frac{R}{\rho} \partial \rho$

① 由于 l 形变, 使 $\partial R = \frac{R}{l} \partial l$ 变化, 实现：应变式电阻传感器

② 由于固体收到作用力后, 电阻率 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ 变化, 使 $\partial R = \frac{R}{\rho} \partial \rho$ 变化, 实现：压电式电阻

传感器

(2) 选择应变片传感器。传感器结构如图 1 所示, 包括应变片、悬臂梁、固定支架、托盘。

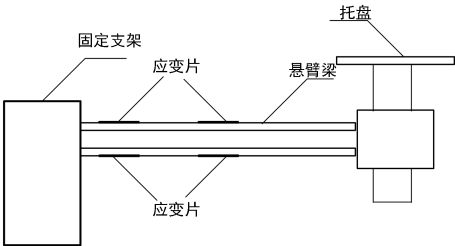


图 1 传感器结构

托盘：放置砝码；固定支架：用于固定，以稳定传感器；悬梁臂：检测托盘的受力状况；应变片：转换悬梁臂被测部位受力状态变化，将应变片串联或并联组成电桥，用于检测电路。

(3) 测量电路如图 2 所示，采用直流电桥。

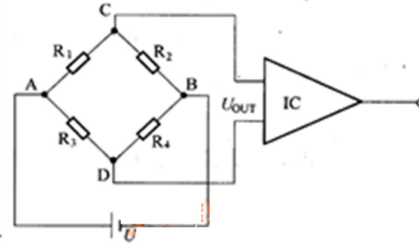


图 2 测量电路图

将电桥的各个桥臂全部或部分接成应变电阻，电桥输出电压为：

$$U_0 = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U$$

$$\text{当各桥臂有变化时: } U_0 = U \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)}$$

当电桥为等桥臂电桥时，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ：

$$U_0 = U \frac{R(\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4) + \Delta R_1 \Delta R_4 - \Delta R_2 \Delta R_3}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)}$$

工作过程为：

重力 $G \updownarrow \rightarrow$ 压力 $F \updownarrow \rightarrow$ 引起弹性体发生形变 $\updownarrow \rightarrow$ 电阻应变片形变 $\updownarrow \rightarrow$ 电阻 $R \updownarrow$

电阻 $R \updownarrow \rightarrow$ 检测电路 (全桥电路) $\updownarrow \rightarrow$ 输出电压 $U \updownarrow$

,从而得

到 $U \propto G$

$$(4) \text{ 灵敏度: } K = \frac{4mv}{2kg} = \frac{10mv}{5kg} = \frac{20mv}{10kg} = 2mv/kg$$

$$\text{最大绝对误差: } \delta_{\max} = \max\{\Delta U\} = \max|U_n - U_e|, \text{ 其中 } U_n \text{ 表示示值, } U_e \text{ 表示真值。} \\ = 1mv/kg$$

$$\text{满度相对误差: } \gamma_m = \frac{\delta_{\max}}{x_n} \times 100\% = 10\%, \text{ 其中 } x_n \text{ 表示满量程, } \delta_{\max} \text{ 表示最大绝对误差。}$$

精度级别：0.1

(5) 最小二乘法进行拟合。

设最佳拟合方程为： $Y = A + Bx$ ，其中 A 为直线的截距，B 为直线的斜率。

则数学表达式如①②③所示，计算可得 A、B：

$$\textcircled{1} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial A} = \sum_{i=1}^n [-2(y_i - A - Bx_i)] = 0$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial B} = \sum_{i=1}^n [-2x_i(y_i - A - Bx_i)] = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = nA + B \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\textcircled{2} \quad \sum_{i=1}^n x_i y_i = A \sum_{i=1}^n x_i + B \sum_{i=1}^n x_i^2$$

$$\textcircled{3} \quad A = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$B = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

(二) (本题共 20 分) (1) 采用差动结构的变电抗式传感器进行测量的优点有哪些 (2 分) ?

(2) 请用差动结构的螺线管设计一个加速度传感器, 画出该加速度传感器的结构图, 说明其工作原理 (4 分)。(3) 差动结构变电抗传感器缺点是容易产生零点残余电压, 请问零点残余电压产生原因 (3 分)。(4) 画出该加速度传感器的检测电路, 使其能够同时测量大小和方向, 指出其方向检测电路名称并详细说明其方向检测原理 (5 分)。

如果一组测量数据如下表, 请计算其 A 类不确定度 (6 分)。

题 (二) 表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标准值 m/s^2	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75
测量值 m/s^2	0.52	0.76	1.99	1.28	1.54	1.80	1.99	2.30	2.56	2.81

答:

(1) ①灵敏度扩大一倍②线性度扩大一倍③量程扩大一倍

(2) 加速度传感器结构图如图 1 所示。其中 1 为悬臂梁, 2、3 为差动变压器 L_1 、 L_2 , 4 为配重铁芯, 质量为 m 。根据牛顿第二定律 $F=ma$ 可知, 当传感器随物体向上运动时, 内部铁芯由于惯性作用, 相对差动变压器向下运动, 因此 L_1 电感值变小, L_2 电感值变大, 从而引起差动变压器两端电压 U 发生变化, 便可计算出 F 大小和方向, 再根据 $a=F/m$ 求出加速度大小和方向。向下运动时同理。

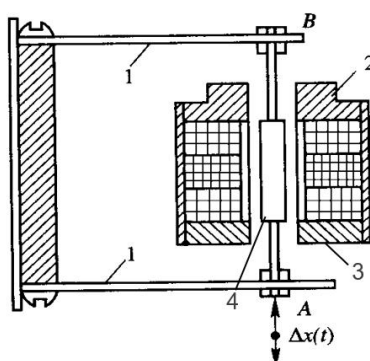


图 1 加速度传感器结构图

(3) ①基波分量, 由于差动变压器两个次级绕组不可能完全一致, 因此它的等效电路参数 (互感 M 、自感 L 及损耗电阻 R) 不可能相同, 从而使两个次级绕组的感应电动势数值不等。又因初级线圈中铜损电阻及导磁材料的铁损和材质的不均匀, 线圈匝间电容的存在等因素, 使激励电流与所产生的磁通相位不同。

②高次谐波, 高次谐波分量主要由导磁材料磁化曲线的非线性引起。由于磁滞损耗和铁磁饱和的影响, 使得激励电流与磁通波形不一致产生了非正弦(主要是三次谐波)磁通, 从而在次级绕组感应出非正弦电势。另外, 激励电流波形失真, 因其内含高次谐波分量, 这样也将导致零点残余电压中有高次谐波成分。

(4) 检测电路如图 2 所示，相敏整流电桥，设差动电感传感器的线圈阻抗分别为 Z_1 和 Z_2 。当衔铁处于中间位置时， $Z_1=Z_2=Z$ ，电桥处于平衡状态，C 点电位等于 D 点地位，电表指示为零。当铁芯上移时，线圈 L_1 阻抗增大， $Z_1=Z+\Delta Z$ ，则 L_2 线圈阻抗减少， $Z_2=Z-\Delta Z$ 。如果输入交流电压为正半周，则 A 点电位为正，B 点电位为负，二极管 V_1 、 V_4 导通， V_2 、 V_3 截止。在 A-E-C-B 支路中，C 点电位由于 Z_1 增大而比平衡时的 C 点电位降低；而在 A-F-D-B 支中中，D 点电位由于 Z_2 的降低而比平衡时 D 点的电位增高，所以 D 点电位高于 C 点电位，直流电压表正向偏转。如果输入交流电压为负半周，A 点电位为负，B 点电位为正，二极管 V_2 、 V_3 导通， V_1 、 V_4 截止，则在 A-F-C-B 支中中，C 点电位由于 Z_2 减少而比平衡时降低（平衡时，输入电压若为负半周，即 B 点电位为正，A 点电位为负，C 点相对于 B 点为负电位， Z_2 减少时，C 点电位更负）；而在 A-E-D-B 支路中，D 点电位由于 Z_1 的增加而比平衡时的电位增高，所以仍然是 D 点电位高于 C 点电位，电压表正向偏转。同样可以得出结果：当衔铁下移时，电压表总是反向偏转，输出为负。可见采用带相敏整流的交流电桥，输出信号既能反映加速度的大小也能反映方向。

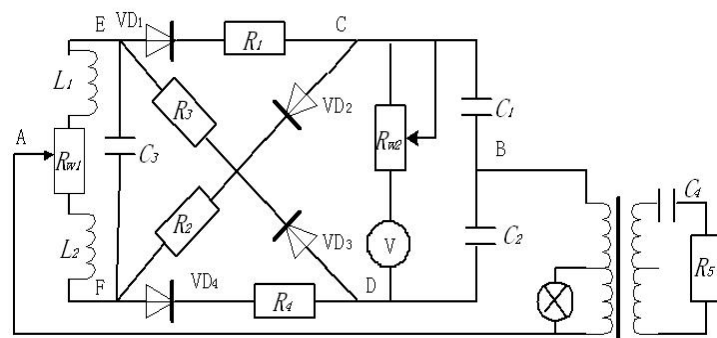


图 2 相敏整流电桥检测电路

(5) 根据公式 A 类不确定度 $u_A=S(\bar{x})$ ， $S(\bar{x})=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$

① \bar{x}_i 分别为各自标准值，查表可得

② 计算残差

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0.0004 + 0.0001 + 0.0001 + 0.0009 + 0.0016 + 0.0025 + 0.0036 + 0.0036 = 0.0128$$

$$\textcircled{3} \text{ A 类不确定度为 } u_A = \sqrt{\frac{0.0128}{90}} = 0.01192569$$

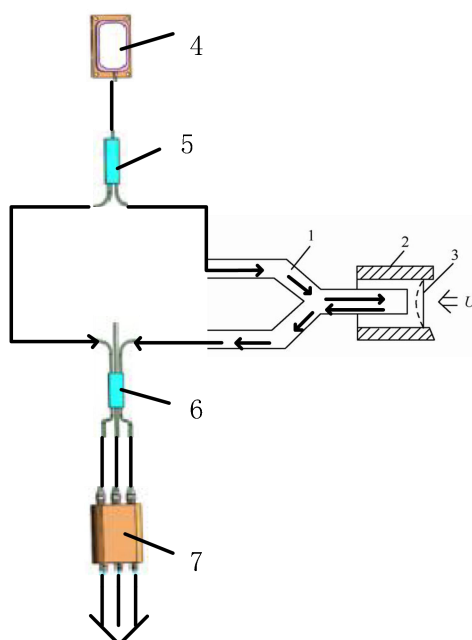
(三) (本题共 14 分) (1) 请设计一个采用弹性膜片元件的光纤压力传感器, 画出其结构示意图并解释其工作原理 (4 分)。(2) 根据光纤导光原理, 光纤传感器一般采用单模光纤而非多模光纤, 为什么 (2 分)? (3) 请用合适的光电式传感器设计一个风速传感器, 如果光电调制盘每转一圈为 0.1m/s, 要求风速测量分辨率为 0.025m/s, 画出该风速传感器的结构原理图, 并解释其工作原理 (5 分)。(4) 如果 5 秒内检测电路输出的信号如下图所示, 请问其平均风速是多少 (3 分)?



题 (二) 图

答:

(1)



图中是膜片反射式光线压力传感器链路示意图, 图中 1 是 Y 型光纤传感器探头, 2 是壳体, 3 是弹性膜片元件, 4 是光源, 5、6 是耦合器, 7 是光电转换器。

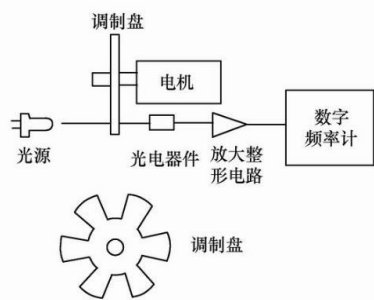
工作原理 (原理不唯一): 光源产生的一束光经二分耦合器分为两束一模一样的光信号, 一束作为参考信号, 另一束作为载波进入压力传感器, 当外界压力引起弹性膜片元件形变后, 膜片的中心挠度与所呈的压力有关, 利用 Y 形光纤束位移特性, 则反射回的光信号的强度发生变化, 由此携带了外界压力信息。通过光电传感器将光信号转换为电信号, 再经过相应的解调算法, 可计算出压力信息。

(2) 按传输模式分为单模光纤和多模光纤。多模光纤可传多种模式的光, 但其模间色散较大, 限制了传输数字信号的频率, 而且随距离的增加会更加严重, 因此, 多模光纤传输的距离就比较近, 一般只有几公里; 单模光纤只能传一种模式的光, 其模间色散很小, 适用于远程通讯。模式太多对信号传输不利, 会使信号产生畸变。

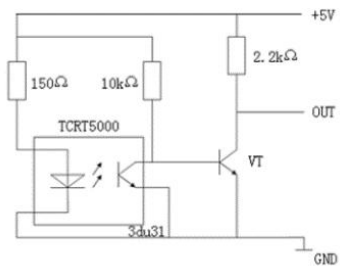
(3) 光电器件的输出仅有两个稳定状态, 也就是“通”与“断”的开关状态。光电器件受光照

时，有电信号输出，光电器件不受光照时，无电信号输出。

工作原理：风速传感器由调制盘、光电传感器和数字频率计组成。当风速传感器受水平风力作用而导致调制盘旋转时，光电器件输出频率信号。光电传感器自带一个光源和一个光电器件，光源发出的光被待测物体遮挡或穿过，光敏元件则表现为“断”和“通”，再经过相关电路处理将接收到的光信号变成电信号，由放大电路将采集到的信号放大输入单片机进行计数。用来检测明暗的变化，探测有无物体的接近。



系统结构图

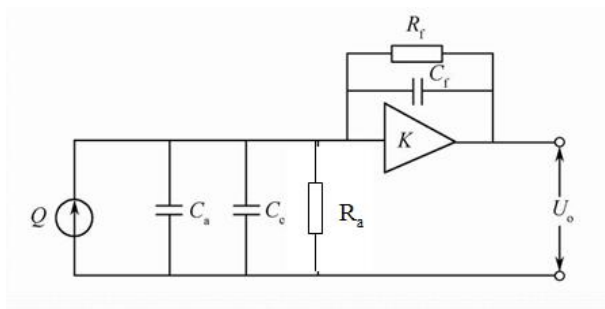


放大电路图参考

根据题意转盘每转一圈代表风速 0.1m/s ，表示理想状况下， 1s 内转盘转过一圈，代表风走过了 0.1m 距离，则通过单片机控制定时 $T0$ 和计数 $T1$ ，同时打开和重置定时 $T0$ 和计数 $T1$ ，完成一次打开和重置则可计算当前风速为（计数 $T1$ 获取的点数） $\times 0.1\text{m/s}$ ，要求风速测量分辨率为 0.025m/s ，可以在转盘上均匀打四个孔。

（4）从图中看出有 28 个高电平，说明光电传感器接收端收到 28 次红外光，表示 1s 内调制盘每转一圈为 0.1m 前提下， 5s 内转过了 28 圈，可求得均匀风速为 $28/5 \times 0.1 = 0.56\text{m/s}$ ；若分辨率为 0.025m/s ，则求得均匀风速为 $28/4/5 \times 0.1 = 0.14\text{m/s}$ 。

(四) (本题共 18 分) (1) 请叙述压电传感器的基本原理 (2 分)。(2) 请用压电传感器设计一个液位测量装置, 请阐述该液位测量装置的工作原理, 并请问压电传感器在发射、接收状态是分别是基于何种效应 (5 分)? (3) 如果压电传感器后必须接前置放大器, 请问一般接何种放大器, 各用于什么场合 (3 分)? (4) 指出下图为何种前置放大器? 已知 $C_a=100\text{pF}$, $R_a=\infty$, $C_f=10\text{pF}$, 若考虑引线 C_c 的影响, 当放大器的开环增益 $K=10^4$ 时, 要求输出信号衰减小于 1%, 如果使用 90pF/m 的电缆, 求其最大允许长度是多少 (8 分)?

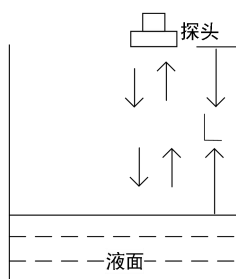


题 (四) 图

答:

(1) 压电式传感器在外界压力作用下, 在电介质表面上产生电荷, 电荷经电荷放大器和测量电路放大和变换阻抗后就成为正比于所受外力的电量输出从而实现非电量电测目的。

(2) 逆压电效应将高频电振动转换成高频机械振动, 以产生超声波, 可作为发射探头。利用正压电效应则将接收的超声振动转换成电信号, 可作为接收探头。将超声电脉冲加到压电晶片上, 利用逆压电效应, 使晶片发射出持续时间很短的超声振动波。当超声波经被测物反射回到压电晶片时, 利用压电效应, 将机械振动波转换成同频率的交变电荷和电压。在液罐上方安装空气传导型超声发射器和接收器, 根据超声波往返的时间就能测得液位。如图所示, $L=Ct/2$ (其中 C 为 超声波在被测介质中的传播速度, t 为超声波往返时间。); 发射, 依据压电晶体的逆压电效应效应; 接收, 依据压电晶体的压电效应。



测液位示意图

(3) 电荷放大器, 电压放大器;

压电式传感器在与电压放大器配合使用时, 适合电缆短的场合;

而压电式传感器在与电荷放大器配合使用时, 适合电缆长的场合。

(4) 电荷放大器; 经电荷放大器输出电压幅值

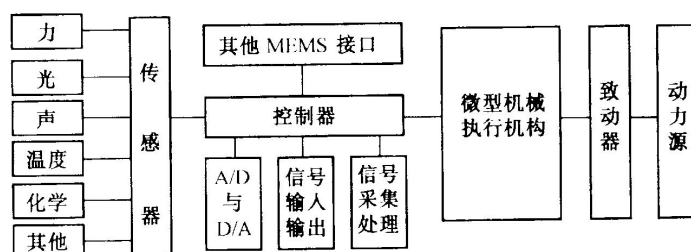
$$\begin{aligned} u_{om} &= -Ku_m = -KQ/(C_a + C_c + C_i + (1+K)C_f) \\ &= -KQ/(C_a + C_c + (1+K)C_f) \\ &\approx -Q/C_f = u'_{om}, \end{aligned}$$

$(u'_{om} - u_{om})/u'_{om} = 1\%$, 代入数据, 得 $C_c = 910\text{PF}$, 则电缆允许最大长度为 $910/90 \approx 10\text{m}$

(五) (本题共 12 分) (1) 何为 MEMS (2 分)? (2) MEMS 的一般性组成框图是什么? 各部分的作用是什么 (4 分)? (3) 请设计一个智能胶囊消化道内窥镜 MEMS 系统, 画出其构成框图, 并解释其工作原理 (6 分)?

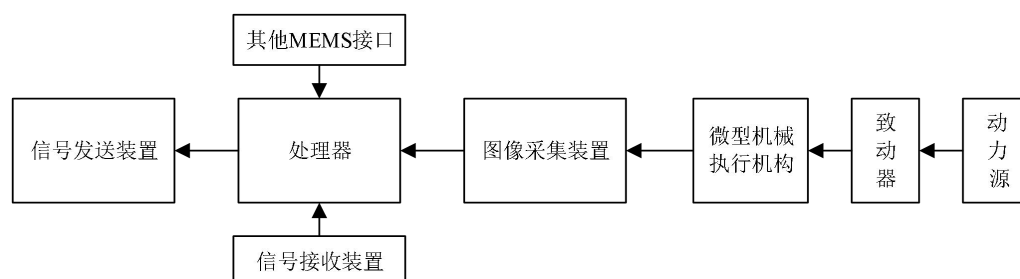
答: (1) MEMS:即微机电系统是微电子与微机械的结合。可以看作是微型机器人, 它与微电子的联系主要是用在半导体集成电路的微电子工艺和加工方法, 因为微机电系统里面有机械系统, 所以它和微电子有着本质区别。

(2) 微机电系统的组成框图如下图所示, 它是将微机械、信息输入的微型传感器、控制器、模拟或数字信号处理器、输出信号接口、致动器(驱动器)、电源等都微型化并集成在一起, 成为一个微机电系统。微机电系统内部可分成几个独立的功能单元, 同时又集成为一个统一的系统。



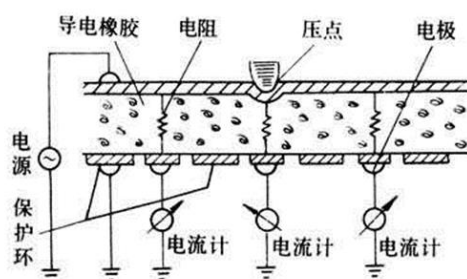
- ①传感器: 将检测到的信号转换成电信号并传输给控制器。
- ②其他 MEMS 接口: 扩展微机电系统的功能。
- ③A/D 与 D/A: 模数转换与数模转换。
- ④控制器: 是微机电系统的核心, 负责将来自各传感器的检测信号和外部输入命令进行集中、存储、计算、分析, 根据信息处理结果, 按照一定的程度和节奏发出相应的指令, 控制整个系统有目的地进行。
- ⑤微型机械执行机构: 根据控制器的指令驱动机械部件的运动。
- ⑥致动器: 将外加电信号处理为外界激励作用, 将电机的旋转运动转换为推杆的直线运动
- ⑦动力源: 是微机电系统能量供应部分, 其作用是按照系统控制要求向机械系统提供能量和动力使系统正常运行。

(3)



OMOM 胶囊内镜的工作原理是: 患者像服药一样用水将智能胶囊吞下后, 它即随着胃肠肌肉的运动节奏沿着胃→十二指肠→空肠与回肠→结肠→直肠的方向运行, 同时对经过的腔段连续摄像, 并以数字信号传输图像给病人体外携带的图像记录仪进行存储记录。医生通过影像工作站分析图像记录仪所记录的图像就可以了解病人整个消化道的情况, 从而对病情做出诊断。其中处理器中包含了如何准确保证图像位置、确保图像处理的结果准确和数据传输三个关键技术。

(六) (本题共 13 分) (1) 机器人传感器包括哪些 (2 分)? (2) 请描述下图中的高密度分布型压觉传感器工作原理 (4 分)。(3) 何为智能传感器? 与一般意义上的传感器有何区别? 区别之处的主要完成的功能是什么 (4 分)? (4) 与传统传感器相比, 智能传感器有如下优势 (3 分)?



题 (六) 图

答:

(1) 机器人传感器包括内部传感器和外部传感器;

(2) 高密度分布型传感器是以压敏导电橡胶为基础材料的压觉传感器。在导电橡胶上面附有柔性保护层, 下部装有玻璃纤维保护环和金属电极。在外压力作用下, 导电橡胶电子发生变化, 是基底电极电流相应变化, 从而检测出与压力成一定关系的电信号及压力分布情况。通过改变导电橡胶的渗入成分可控制电阻的大小。例如渗入石墨可加大电阻, 渗碳、渗镍可减小电阻。通过合理选材和加工可制成高密度分布式压觉传感器。

(3) 1.智能传感器是具有信息处理功能的传感器。智能传感器带有微处理机, 具有采集、处理、交换信息的能力, 是传感器集成化与微处理机相结合的产物。

2.与一般传感器相比, 智能传感器具有以下三个优点:

- ①通过软件技术可实现高精度的信息采集, 而且成本低;
- ②具有一定的编程自动化能力;
- ③功能多样化。

3.主要功能:

- ①具有自校零、自标定、自校正功能;
- ②具有自动补偿功能;
- ③能够自动采集数据, 并对数据进行预处理;
- ④能够自动进行检验、自选量程、自寻故障;
- ⑤具有数据存储、记忆与信息处理功能;
- ⑥具有双向通信、标准化数字输出或者符号输出功能;
- ⑦具有判断、决策处理功能。

(4) 与传统传感器相比, 智能传感器有如下优势:

- ①精确度高;
- ②可靠性与稳定性高;
- ③高信噪比与高分辨率;
- ④自适应性强;
- ⑤性价比高。