

# 目 录

1、电阻应变计粘贴实验.....	1
2、内压薄壁容器应力测定实验.....	3
3、外压容器失稳试验.....	6
4、活塞式压缩机性能实验.....	10
5、临界转速测量实验.....	12
6、超声波检测及等级评定实验.....	14
7、着色探伤实验.....	19
8、焊缝射线透照缺陷分析、判断和评定实验.....	21
9、外在因素对金属腐蚀速度影响的实验.....	23
10、电涡流式传感器的特性实验.....	25
11、光纤传感器实验.....	27
12、数字式热电阻温度变送器的调校实验.....	29
13、毫伏变送器、数字调节器和执行器的调校实验.....	32
14、单回路控制系统的模型求取和非线性控制实验.....	34
15、单回路控制系统的控制参数整定实验.....	37

# 电阻应变计粘贴实验

## 一、实验目的

1. 了解压力容器应力的测量原理；
2. 了解电测法测量应变的基本方法；
3. 理解四臂电桥在实际测量过程中的使用；
4. 掌握电阻应变计的粘贴要求和方法、焊接的基本操作、电阻的测定。

## 二、实验原理

将试件表面清理光洁，然后将电阻应变计用 502 胶水粘贴在试件的光洁表面，待胶水干燥后，加载荷，使电阻应变计随试件表面产生的变形而变形，从而其电阻发生变化，电阻的变化经电桥放大后输入到电阻应变仪中，再将此信号转换为电流或电压以应变示值输出。

## 三、实验仪器及有关材料

压力容器材料试板、电阻应变计、万用表、电烙铁、焊锡、502 瞬干胶、丙酮、砂纸、脱脂棉等。

## 四、实验步骤

1. 应变计检查：检查应变计片基上是否有气泡、脱层，片丝有无折皱、断裂、锈蚀，引线接头有无松脱，区分其正反面，然后用万用表测应变计的阻值（ $120\ \Omega$ ）是否符合要求，阻值差别在 $\pm 0.2$ 欧以内为宜。

2. 清洗试件表面：首先，根据测量部位表面的粗糙程度，对贴片区分别采用砂纸、锉刀等工具除去表面的铁锈、油漆等，采用汽油或油精洗去表面的油污；其次，在贴片处打成交叉纹路，以增加粘接力；最后，再用丙酮清洗。

3. 划线：用硬度为 H 的铅笔、直尺，在贴片区预定位置上，划出贴片定位轴线 X、Y，应变计的丝轴与 X 轴同向，X、Y 交点为丝栅中心。

4. 贴片：在试件贴片位置表面及应变片底面涂上一层薄薄的 502 胶，涂敷面积略比片基底尺寸大 3~5 毫米，注意胶水不能过多，且一定要均匀，将应变计粘贴到贴片部位上，贴片应快而准确。

5. 干燥固化：应变计贴上后，在其上覆盖一张聚四氟乙烯薄膜，然后用大拇指轻轻滚压，以挤出气泡和多余的胶水后按住不动，约保持三分钟即可将手松开，待胶水干燥固化后再轻轻撕去覆盖的薄膜。

6. 检查：在电阻计引出线下垫以绝缘胶纸，并用万用表测量电阻应变计的阻值，看是否发生大的变化，若有大变化，则贴片失败；同时还应测量

电阻计对试件的的绝缘电阻，电阻值应在  $200\sim 500M\Omega$ （无穷大）以上，否则出现“贴通”现象，贴片失败。

7、焊接：应变计贴牢之后，用导线与应变计引出线搭焊，注意防止虚焊、假焊和焦焊。用胶布将导线焊接端紧固于试件上以防止移动导线时将应变计拉坏。再次测量电阻值。

## 五、实验记录

电阻值：贴片前：

贴片后：

焊接后：

对地：

## 六、实验结果分析、讨论

# 内压薄壁容器应力测定实验

## 一、实验目的

1. 测定受内压的薄壁容器顶盖和筒体的应力分布，从而通过应力分析了解顶盖的形状及边缘应力对薄壁容器强度的影响；
2. 掌握电阻应变仪测定静态应变的原理和方法。

## 二、实验原理

分析薄壁壳体的应力有两种理论，一种是有力矩理论，一种是无力矩理论。后者认为壳体在承受内压时，壁内只有拉应力或压应力，不存在弯曲应力。但事实上壳体中多少还存在一些弯曲应力，只是这些弯曲应力很小，可以忽略不计。

### 1. 应力应变关系

在弹性范围内，薄壁壳体上任一点的两向应力和应变有如下关系：

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1)$$

式中 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ ——任一点的经向与周向应变；

$\mu$ ——材料的泊松比，对于钢质材料，可取为0.3；

$E$ ——材料的弹性模量，对于钢质材料，可取 $2.1 \times 10^5$  MPa。

用电阻应变仪可以测得各点的应变值，再通过上面的关系式，便可以求出相应的应力。

### 2. 电测原理

#### (1) 电阻法

根据电学知识知道金属丝的电阻和它的材料性质、尺寸的关系是：

$$R = \rho \frac{L}{F}$$

式中 $R$ ——电阻， $\Omega$ ；

$\rho$ ——电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

$L$ ——长度， $\text{m}$ ；

$F$ ——横截面积， $\text{mm}^2$ 。

如金属丝的长度伸长或缩短了一个 $\Delta L$ ，则电阻 $R$ 也就增加或减少了一个 $\Delta R$ ，即成如下正比关系：

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \frac{\Delta L}{L} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L}$$

电阻应变仪就是利用这一基本原理，把电阻应变计粘贴在要测量的构件表面，构件受力后，表面各点有了变形，金属电阻丝也就跟着伸长或缩短了，这样电阻丝就有了电阻的变化，为了便于测量，要求电阻变化大些，所以把电阻丝做成栅状，如图 2-1 所示的电阻片。

$$\text{因 } \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon$$

$$\text{所以 } \varepsilon = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

式中 K 是比例常数，称作灵敏系数，应变计电阻丝的电阻与金属丝的横向变形、绕丝的类型、电阻丝的材料性质、尺寸等有关，所以灵敏系数 K 值包含了很多因素，此值由制造厂提供。因此，只要测得电阻改变值  $\Delta R$  即可得到应变  $\varepsilon$ 。

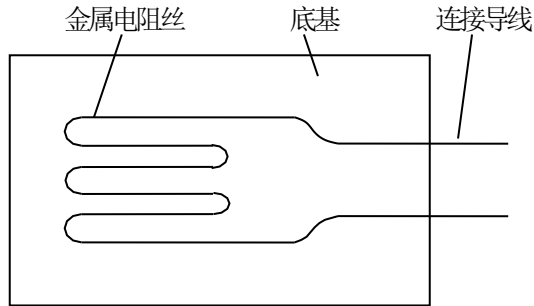


图 2-1 电阻应变计示意图

## (2) 电阻应变仪

电阻应变仪是利用平衡电桥的原理来测量变形的仪器。如图 2-2 所示，根据电学原理，平衡电桥的四个电阻关系为：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

则 A、B 两点的电位相同，此时接 A、B 两点的电流计中没有电流通过，这时称为平衡电桥。如果任一电阻  $R_1$  变大了，则上述关系不成立，电桥不平衡，A、B 两点就有电位差，电流计中就有电流通过。如果  $R_2$  是一个可调节大小并有读数的可变电阻，当  $R_1$  变化时，相应地改变  $R_2$  的大小，从而维持电桥的平衡，则可根据  $R_2$  的变化确定  $R_1$  的变化。

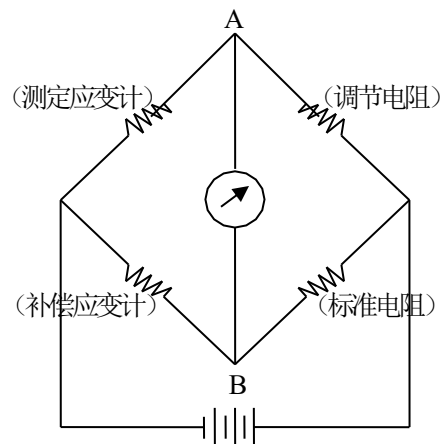


图 2-2 电阻应变仪的电测原理

用电阻应变仪来测量电阻应变计的电阻变化， $R_1$  就是贴在构件上的被测点， $R_3$  是贴在与被测构件相同材料而不受力的电阻应变计，称为补偿应变计，因为在测量过程中被测构件可能有温度变化，构件即使不受力，测定电阻应变计的电阻也会变化，这就造成了温度误差。补偿应变计就是为了自动地补偿温度差所造成的误差，因而温度变化时测定电阻应变计与补偿应变计的电阻是同样变化的。

为了调节电桥平衡， $R_2$  为连接在 A 点的一调节电阻，改变  $R_2$  的大小就可以使测定电阻应变计电阻改变所造成的电桥不平衡重新平衡。根据调节  $R_2$  时的方向大小，就能决定是拉应力或压应力以及应力数值的大小。

为了简化测量与运算手续，可采用电阻应变仪把电阻的变化情况直接用应变  $\varepsilon$  指示出

来。

### 三、实验仪器及材料工具

1. DH3818-1 型静态应变测量仪;
2. 丝式应变计 ( $R=120\Omega$ ); 导线;
3. HJS02 型内压力容器应力测试实验台。

### 四、实验步骤

1. 检查各测点的电阻应变计是否和 DH3818-1 型静态应变测量仪连接完毕;
2. 接通电源, 使 DH3818-1 型静态应变测量仪处于接通工作状态;
3. 测量: 容器加压, 当载荷加上时, 按照 DH3818-1 型静态应变测量仪的操作流程进行操作并测量出各测点的应变值。

### 五、实验报告

1. 实验目的;
2. 实验原理;
3. 实验仪器及设备;
4. 拟定的实验方案, 布片位置讨论, 补偿方法;
5. 列出数据记录表;
6. 计算各测点的实际测量经向、周向应力值;
7. 应力分布分析;
8. 实验误差分析。

# 外压容器失稳试验

## 一、实验目的

1. 观察薄壁圆筒形容器在外压作用下丧失稳定后的形态，从而区别及掌握容器在外压作用和内压作用下的变形和破坏的实质；
2. 测定薄壁圆筒形容器在外压作用下失去稳定性时的临界压力，并与理论值相比较；
3. 观察薄壁圆筒形容器在外压作用下，轴向力对失去稳定性的影响。

## 二、实验原理

圆筒形容器在外压作用下，常因刚度不足而使容器失去其原有形状，即被压扁或折曲成波形，这就是容器的失稳现象。容器失稳时的外压力称为该容器的临界压力  $p_{cr}$ ，其横截面被折曲成波形，波数  $n$  可能是 2、3、4、……等任意整数，如图 3-1 所示。

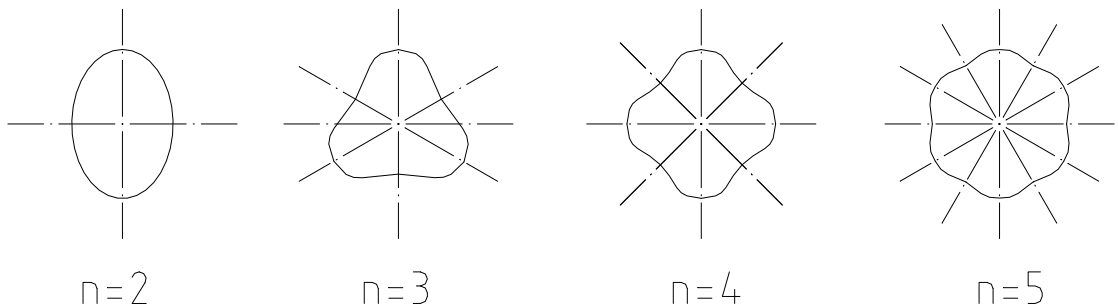


图 3-1 圆筒失去稳定后的形状

圆筒形容器的临界压力  $p_{cr}$  的大小主要取决于容器的几何尺寸 ( $L$ 、 $D$ 、 $\delta_e$ ) 及所用材料的性质 ( $E$ 、 $\mu$ ) 的影响，壳体椭圆度与材料的不均匀性，能够使临界压力  $p_{cr}$  的数值降低。

外压圆筒根据其失效情况，可分为长圆筒、短圆筒和刚性圆筒三种。刚性圆筒一般具有足够的刚度，可不必考虑稳定性问题。一般长圆筒、短圆筒之间的划分用临界长度  $L_{cr}$  表示，如外压圆筒的计算长度  $L > L_{cr}$  为长圆筒， $L < L_{cr}$  为短圆筒。临界长度由下式确定：

$$L_{cr} = 1.17D\sqrt{D/\delta_e} \quad (1)$$

1. 长圆筒：失稳时波数为  $n=2$ ，临界压力仅与  $\delta_e/D$  有关，与  $L/D$  无关，临界压力  $p_{cr}$  的计算式为：

$$p_{cr} = \frac{2E}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta_e}{D_o}\right)^3 \quad (2)$$

2. 短圆筒：失稳时波数为  $n > 2$ ，如 3、4、5、……，其波数  $n$  可近似地认为：

$$n = \sqrt[4]{\frac{7.06}{(L/D)^2(\delta_e/D)}} \quad (3)$$

临界压力  $p_{cr}$  的计算公式为：

$$p_{cr} = \frac{ES}{D} \left[ \frac{n^4}{8n^4(n^2-1)} \left(\frac{D}{L}\right)^4 - \frac{2(n^2-1)}{3(1-\mu^2)} \left(\frac{S}{D}\right)^2 \right]$$

(4)

或用最小  $p_{cr}$  的近似计算式计算：

$$p_{cr} = \frac{2.59 E \delta_e^2}{LD \sqrt{D/\delta_e}} \quad (5)$$

公式 (4)、(5) 必须符合的条件为：圆筒器壁中所产生的周向应力  $\sigma_{cr}$  小于操作温度的下屈服强度  $R_{eL}^t$ ，即

$$\sigma_{cr} = \frac{p_{cr} D}{2\delta_e} < R_{eL}^t$$

对于外压容器临界压力的计算，有时为了计算方便，可借助于图算法进行计算。

### 三、实验设备及工具

1. 实验设备见图二
2. 工具：游标卡尺一把，千分卡一把，外卡一个，扳手两把。
3. 实验用搪瓷口缸毛坯，材料为 Q235A。

### 四、实验步骤：

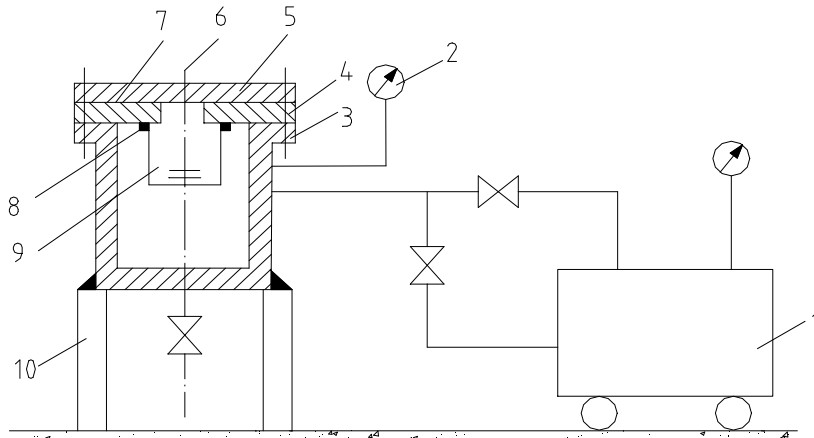
1. 实验前测量试件有关参数： $L$ （长度）、 $\delta_e$ （壁厚）、 $D$ （直径）；
2. 按图 3-2 安装实验装置，先将试件 9 置于平顶盖 4 上，试件与平顶盖间用密封垫 7 密封，再用固定铁块 8 将试件压紧，然后，将平顶盖置于筒体 3 上，用螺栓上紧。

在测试加以轴向力以抵消试件受外压时的轴向载荷时，由平顶盖孔内将心轴 6 装入与试件底部贴紧，最后用压板 5 将心轴压紧。

3. 开启阀门注入水压（也可预先加水），加压时务必需注意压力表的读数和试件在有轴和无轴时丧失稳定的情况，记下丧失稳定时的压力（即  $p_{cr}$ ）。



4. 卸压，取出试件，观察失稳后试件的形状，并记下波数  $n$ 。
5. 实验完毕，排除筒体内的积水，清理好实验设备。



1-试压泵； 2-压力表； 3-筒体； 4-平顶盖； 5-心轴压板；  
6-心轴； 7-密封垫； 8-固定铁块； 9-试件； 10-支架；

图 3-2 实验装置图

## 五、实验报告

1. 实验目的；
2. 实验原理；
3. 实验设备及工具；
4. 记录整理测量到的试件几何尺寸数据 ( $L$ 、 $D$ 、 $\delta_e$ )；
5. 计算容器的临界压力与波数，并与实测值进行比较；
6. 讨论、分析实验结果。

表 1

单位: mm

测量序号 几何参数 (mm)	试 件 1						试 件 2					
	1	2	3	4	5	平均值	1	2	3	4	5	平均值
长度 (L)												
内径 (D <sub>i</sub> )												
外径 (D <sub>o</sub> )												
中径 (D)	D = (D <sub>i</sub> +D <sub>o</sub> ) / 2 =						D = (D <sub>i</sub> +D <sub>o</sub> ) / 2 =					
有效厚度 (δ <sub>e</sub> )	δ <sub>e</sub> = (D <sub>o</sub> -D <sub>i</sub> ) / 2 =						δ <sub>e</sub> = (D <sub>o</sub> -D <sub>i</sub> ) / 2 =					
临界长度 (L <sub>cr</sub> )												
圆筒长度 (L)	(长、短) 圆筒						(长、短) 圆筒					

表 2

试件序号	容器失稳时临界压力 p <sub>cr</sub> 与波数 n				误差分析	
	实 测 值		理 论 值		绝对误差	相对误差
	p <sub>cr</sub> (MPa)	n	p <sub>cr</sub> (MPa)	n	p <sub>cr理</sub> - p <sub>cr实</sub>	$\frac{ p_{cr理} - p_{cr实} }{p_{cr理}}$
					(MPa)	
					(MPa)	

# 活塞式压缩机性能实验

## 一、实验目的

1. 了解压缩机主要零部件结构及工作性能、排气量测定；
2. 了解运动机械做工及功率消耗；
3. 掌握压缩机  $p$ - $V$  图的测试方法；
4. 测试示功图、轴功率。

## 二、实验原理

活塞式压缩机是一种容积式压缩机，它依靠气缸容积进行周期性变化而工作。气缸与活塞端面之间形成的封闭容积是活塞式压缩机的工作容积，曲柄连杆机构推动活塞不断在气缸中作往复运动，使气缸通过吸气阀和排气阀的控制，依次地进行吸气—压缩—排气—膨胀过程，从而实现压缩机的工作循环过程。

对于往复活塞压缩机的实际工作情况，可以通过它的实际  $p$ - $V$  图进行研究。实际压缩和理论循环相比较有一定区别：

### 1. 受到余隙影响

气缸具有余隙容积。当活塞处于止点位置时，在活塞和气缸盖之间的间隙及气缸到气阀的通道空间内，在排气行程终了时残留有压力为排气压力的气体，当活塞从止点往回运动时，余隙容积中的气体膨胀，当膨胀至气体压力低于名义吸气压力时，才能吸入新鲜气体。所以，由于余隙的存在，使气缸的实际吸气容积小于气缸容积，也小于行程容积。

### 2. 气阀的影响

气体通过气阀和管路时，由于沿程和局部阻力而产生压力损失，所以在吸气期间，气缸内的压力总是低于名义吸气压力。而吸入阀的开始开启到全开更需克服较大的局部阻力，因此该时刻的气缸内压力就更低。

### 3. 热交换的影响

压缩机工作一段时间后，气缸各部分的温度基本趋于稳定，其值高于气体吸入温度，低于排出温度。然而，气体在每一循环中，传热的情况在不断地变化。如在压缩开始时，气体温度低于气缸温度，气体就从气缸取得热量而提高本身温度，此时的压缩过程指数  $m > k$ 。随着压缩过程的进行，气体温度不断提高，气体与气缸的温差逐步减小，到某一瞬时，温差为零，此时压缩过程从多变过程成为绝热过程，即  $m = k$ 。以后气温高于气缸温度，气体向气缸传热，进行多变压缩过程，即  $m < k$ 。膨胀过程与此类似。所以，对压缩机进行实际的示功图的测定具有重要意义，且要注意实际循环过程与理论循环过程两者示功图的区别所在。

压缩机的排气量通常是指单位时间内压缩机最后一级排出的气体换算

到第一级进口状态的压力和温度时的气体容积值。压缩机的额定排气量是指特定进口状态的排气量。实际排气量与理论排气量的比值称为排气系数。排气系数的大小能够反映压缩机气缸行程容积的利用和机器的运转状况，可以用来评价机器的完善程度，是压缩机的重要参数。压缩机的排气量受到以下因素的影响：

1. 进气压力的影响 大气压力受到气温和海拔高度影响，对于已有的压缩机，其排气量随进气压力降低而降低，随进气压力增加而增加。

2. 进气温度的影响 降低吸气温度，可以提高吸气量，增加排气量。

3. 转速的影响。提高转速可以提高排气量，但要考虑机器的强度和振动等问题。

4. 余隙容积的影响。

5. 泄漏的影响。

通常用效率来衡量一台压缩机的完善性，工程上为了便于比较，常取理论循环所消耗的功率做作为衡量实际压缩循环的基础，典型的理论循环有等温理论压缩循环和绝热理论压缩循环，他们的指示效率分别和压缩机轴功率之比就是等温轴效率和绝热轴效率。

测得压缩机配套电机的三相电流、三相电压和功率因素后，就能够得到电机的消耗功率，乘上带轮传动的机械效率  $\eta_d$  就得到传递到飞轮上的功率，再乘以联轴器的机械效率  $\eta_m$ ，就可以得到传递到压缩机曲轴上的功率。再分别和等温理论压缩循环和绝热理论压缩循环的指示功率进行比较，得到压缩机的等温轴效率和绝热轴效率。

### 三、主要仪器设备

W-0.9/8 型活塞式压缩机，HD-91 型闭式示功图测试仪，YB4322 型示波器，压力传感器，热电偶温度计，电流表，电压表，功率因素表，转子流量计，压力表，温度计等。

### 四、实验步骤

1. 观察压缩机结构形状，了解工作流程；
2. 记录压缩机的名义吸气、排气压力，额定容积流量和排气温度等；
3. 开启闭式示功图测试仪，预热 10 分钟；
4. 开启压缩机，观察工作情况；
5. 测量压缩机配套电机的三相电流、三相电压、功率因素；
6. 测量压缩机的排气量、排气压力；
7. 测量压缩机的吸气和排气温度；
8. 测量压缩机的  $p$ - $V$  图；
9. 实验完毕，关机。

### 五、实验结果分析、讨论

# 临界转速测量实验

## 一、实验目的

1. 了解临界转速产生的实质和影响因素；
2. 观察转轴在通过临界转速时的现象；
3. 理解刚性轴与挠性轴的概念及设计规定；
4. 掌握临界转速的测试方法并测定转轴临界转速；
5. 验证临界转速的理论计算方法。

## 二、实验原理

若转子旋转的角速度与转子弯曲振动的固有圆周频率相重合，则转子发生强烈的共振导致转子的破坏，转子与此相应的转速称为转子的临界转速，一旦远离临界转速，则转子运行平稳不发生振动。故对设计和操作者来说，使离心压缩机、离心泵等叶轮机的工作转速远离临界转速，对确保机器工作的安全具有重要意义。

由分析转子横向弯曲振动可知，转子弯曲振动有 1、2、……、 $i$  阶个临界转速。由于实际的转子工作转速不会太大，所以大多关注转子的第 1、2 阶临界转速。为确保机器运行的安全性，要求工作转速远离第 1、2 阶临界转速，校核条件为：

对刚性转子： $n < 0.75n_{c1}$ ；

对柔性转子： $1.4n_{c1} < n < 0.7n_{c2}$ 。

为了防止可能出现的轴承油膜振荡，工作转速应低于两倍的第一阶临界转速，即： $n \leq 2n_{c1}$ 。

对于柔性转子，要求机器在启动、运行或停车过程中，尽快越过第一阶临界转速，决不允许在附近停留，否则转子将因剧烈振动而遭到破坏。

多转子的转轴系统，自由度较多，目前较普遍采用能量法。能量法是一种近似解法而不是理论上的精确解法，其优点是简单可行，计算双支点和多个集中载荷转子的一阶转速比较方便，作为工程计算已具有足够精确度。

光电转速传感器是利用光电变换原理，它基于周期性变换光电元件（如光电池、光敏电阻、光敏晶体管等）受光强弱，而产生与被测轴转速成比例的电脉冲信号。采用单头反射式传感器，在测量转轴转速时，在被测轴上设置反光记号，由光源发生的光线，经聚光镜聚焦折射成平行光束，照射到斜置  $45^\circ$  的半透膜镜，部分光线由半透膜镜反射经聚光镜投射到被测轴上，当被测轴转动时，投射到转轴上的光点遇到轴上的反光记号时，产生反射光线反射经聚光镜、半透膜镜及聚光镜投射到光敏管上，使光敏管感光。于是转

轴旋转时，光敏管间断地交替感光，从而产生电脉冲信号，经适当放大处理，将信号输入到数字式频率计，便可读到比例于转轴转速的数值。若被测轴上的反光记号只有一个，则脉冲频率等于转速，若被测轴上有两个反光记号，则脉冲频率等于两倍转速，依此类推。

光电传感器的特点是能实现非接触测量，对被测轴不增加负载，测量精度比较高，但它在信号脉冲频率较高时，有脉冲信号减弱的缺点。光电转速传感器的测量范围在  $30\text{r/min}\sim 48\text{k r/min}$  之间，一般使用温度在  $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

### 三、实验仪器设备

DT2234A 型数字式光电转速测试仪，临界转速测量试验装置。

### 四、实验步骤

1. 观察与测量临界转速测量实验装置提供的转子系统，分析转子系统的等效系统；
2. 熟悉光电转速测试仪的基本使用方法；
3. 开启电源，缓慢增加转子转速，观察出现的现象并进行判断，注意到振动现象出现 3 次则马上降低转速；
4. 重新将转子加速，并利用光电转速测试仪进行临界转速的测量；
5. 重复测量 2~3 次；
6. 实验完毕，关闭电机。

### 五、实验结果分析、讨论

# 超声波检测及等级评定实验

## 一、实验目的

1. 了解超声波探伤的工作原理和仪器的工作过程；
2. 熟悉探伤仪器，掌握使用直探头和斜探头，对试件进行纵波和横波探伤，确定试件的内部缺陷。

## 二、实验原理

超声波探伤是利用电子仪器产生高频（0.5~10MHz）脉冲电压激发压电晶片，由于这种压电晶片具有电压效应，电能被转换成机械弹性振动成为超声波，向工件内部传播（超声纵波或横波）进行探伤，而在不同介质的界面上（工件表面、内部缺陷、工件底部）反射回来的超声波，又由压电晶片转换成电讯号，经放大后，显示在示波管上，以判断工件内部是否存在缺陷（气孔、夹渣、裂纹、未焊透等）。显然，缺陷越大，从缺陷界面反射回探头所需的时间就越长，因此，根据反射波的强弱和到达时间的长短，就可以探测工件内部缺陷的大小和位置（深度），这就是超声波探伤的基本工作过程。

## 三、实验仪器和工具

CTS—8 型晶体管探伤仪，钢直尺，机油，试件若干。

## 四、实验步骤

### 1. 试件的准备

- （1）准备各种试件，表面具有一定光洁度；
- （2）在探测表面涂上一层耦合剂——机油。

### 2. 仪器的调整

（1）使用 22V~30V 的直流电源，严禁仪器直接接入交流电源中，或将直流电源的极性反接，否则，容易损坏仪器；

（2）接通电源：开启面板上电源开关 K6，这时可听到仪器内部发出频率为 1 千赫的音响，表示仪器工作正常，约 15 秒钟后，荧光屏上应出现扫描基线；

（3）调整辉度、聚焦、波形位置：用起子调节仪器上端的电位器 W10（辉度旋钮）至基线亮度适中，一般在仪器出厂时辉度已调在较亮位置，以后不必常动。调节旋钮 W8（聚焦旋钮）使波形至清晰为止，如果面板上的聚焦控制不能调至波形最清晰时，可用起子略调仪器上端的辅助聚焦电位器至波形更清晰。仪器上端的垂直位移电位器 W11 可供调节基线上下移动，使基线与荧光屏的刻度重合，便于读测。若要调动屏幕上基线左右位置，调节面板上标有“←→”符号的旋钮 W7，可以把始波对准于荧光屏刻度的零位；

(4) 频率调节：超声波工作频率较高，指向性好，声束扩散角小，有利于缺陷的探测，但如果工件结晶颗粒粗大则衰减严重，故一般工件较小结晶细时，选用较高工作频率，如 2.5~5MHz；反之则取 0.5~1.5MHz 的工作频率。频率开关 K1 调准后应配用相应频率的探头；

(5) 输出调节：控制器 W1 主要改变发射脉冲宽度，从而改变超声发射功率。对于小工件近表浅部位的探点或要求较高分辨率时，则可适当将输出减少；如探测距离较大，则可将输出增大；

(6) 探测深度调节：根据被测零件的厚度，调节“粗调”和“细调”两个控制旋钮，先将“细调”置“0”，然后按试件厚度定“粗调”位置，再调节“细调”至适当位置，以便于观察底波显示。为了便于测距，一般应将始波和底波调至荧光屏标尺 0~10 宽度；

(7) 探伤灵敏度调节：这是指示波管荧光屏上反射波脉冲波形高低的调节，以发现工件内部超过规定要求的隐藏缺陷，通常由标准试块并调节“增益”和“抑制”等旋钮来实现，以使缺陷反射能充分的显示；

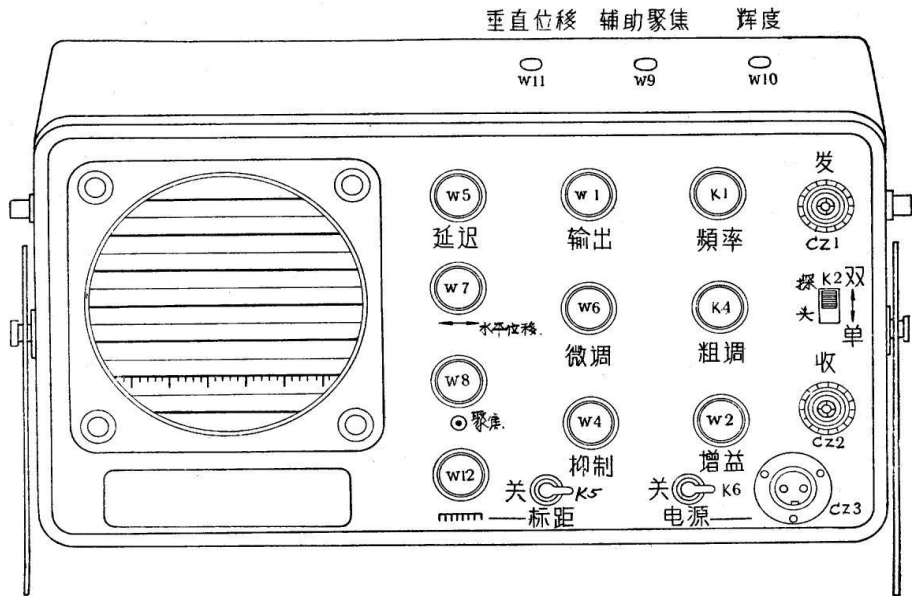


图 6-1 超声波探伤仪的面板排列图

(8) 标距的调节：距离标志是直接测量深度距离的标尺，当距离开关 K5 打开时，荧光屏上即出现一系列相等距离的负向标志脉冲，调整标距 W12 可改变两个脉冲间的距离，使用标距之前，必须对标距进行单位长度校准；

(9) 探头的使用：根据工件大小、形状和探测要求，选择单探头或双探头工作方式和直探头或斜探头进行探伤。通常对此没有严格的规定，以波形显示利于探伤为准。但必须注意像裂纹这一类的危险缺陷，对超声波的反射有方向性，因而往往有必要利用直探头和斜探头从各个方面进行探测，以避免漏检。



直探头：常用 2.5MHz，对形状规则，缺陷多与探测表面平行的工件（如钢板）用直探头较为有利。由荧光屏上波形的相互位置，对应于工作厚度，又可按比例确定缺陷的深度。

斜探头：常用 2.5MHz，对缺陷可能与探测表面垂直或倾斜的工件，尤其是直探头无法接近探测部位的工件（如焊缝）必须用斜探头探伤。

(10) 对指定零件进行探伤并作出记录。

## 五、实验记录

1. 用 CS—1 试块对仪器进行灵敏度校核，选用  $f=2.5\text{MHz}$ ， $D=20\text{mm}$  直探头

表 1

平底孔直径 (mm)		平底孔深度 (mm)	试块	(05)号
仪 器 灵 敏 度	输出		粗调	
	抑制		微调	
	增益			
校核结论：				

2. 按照纵波探伤法对 (01) 号试件位置 I、II、III 中人为缺陷进行检测，根据水平刻度与探测深度成正比原理判定缺陷位置，选用  $f=2.5\text{MHz}$ ， $D=20\text{mm}$  直探头，先调整扫描速度（表 2），后进行缺陷位置的判定（表 3）。

表 2

扫描速度		起始灵敏度			试件检验厚度 (mm)			
粗调	细调	增益	输出	抑制	标记	波幅%	试件号	材料

表 3

试件号	试件厚度 $\delta$ (mm)	底波水平刻度 $\tau_b$ (mm)	比例系数 $K=\delta/\tau_b$	缺陷波水平刻度 $\tau_f$ (mm)	被测表面至缺陷距离	校核结论
(01)						
材 料 缺 陷 编 号	I					
	II					
	III					

### 3. 纵波探伤

(1) 按实验 2 的方法判定 (02) 号试件 A 和 C 部位中人工缺陷的位置，选用  $f=2.5\text{MHz}$ ， $D=14\text{mm}$  直探头（表 5）。

(2) 根据 6 分贝法（半波高度法）对（02）号试件部位 A 中的缺陷进行定量分析，确定缺陷的大小（表 6）。

表 4

扫描速度		起始灵敏度			试件检验厚度（mm）			
粗调	细调	增益	输出	抑制	标记	波幅%	试件号	材料

表 5

试件号	试件厚度 $\delta$ (mm)	底波水平 刻度 $\tau_b$ (mm)	比例系 数 $K=\delta/\tau_b$	缺陷波 水平刻 度 $\tau_f$ (mm)	被测表 面至缺 陷距离 (mm)	校核结论
材料						
缺陷 编号	I					
	II					
	III					

表 6

试件号	(02)	探头中 心移动 距离 L (mm)	声场半扩散角 $\theta=\arcsin(1.22N/D)$	$m=\text{htg}\theta$	缺陷尺寸 $l=L-2m$	校核 结论
缺陷 编号						

#### 4. 横波探伤

被检工件板厚 12mm 的对接试块，探伤为焊缝，板材料为碳钢。对被检工件按如下顺序进行探伤测量：

- (1) 选择探头入射角
- (2) 测量探头的入射点和折射角；
- (3) 扫描速度的调整（按声程调整）；
- (4) 时基轴零点的修正和时基轴的调整；
- (5) 调节起始灵敏度；
- (6) 缺陷位置的测定：
  - ① 缺陷距探测表面的深度；
  - ② 探头至缺陷的水平距离；
- (7) 缺陷大小的确定：

- ① 当量法（并用半波高度法验证）测定缺陷当量尺寸；
  - ② 用半波高度法测定纵向缺陷尺寸。
- (8) 列图表计算并分析讨论。

# 着色探伤实验

## 一、实验目的

1. 了解容器焊缝无损检测的基本方法；
2. 理解着色探伤的基本原理；
3. 掌握着色探伤的基本方法和适用范围。

## 二、实验原理

渗透检测是利用液体的毛细现象检测非松孔性固体材料表面开口缺陷的一种无损检测方法。在装备制造、安装、在役和维修过程中，渗透检测是检验焊接坡口、焊缝等是否存在开口缺陷的有效方法之一。

当被检工件表面存在有细微的肉眼难以观察到的裸露开口缺陷时，将含有有色染料的渗透剂，用浸、喷或刷涂方法涂覆在被测工件表面，保持一段时间后，渗透剂在存在缺陷处的毛细作用下渗透入表面开口缺陷的内部，然后用清洗剂除去表面上残留的多余渗透剂，再用浸、喷或刷涂方法在工件表面涂覆一层显像剂。经过一段时间后，渗透入缺陷内部的渗透剂又将在毛细作用下被吸附到工件表面上来，若渗透剂与显像剂颜色反差明显，则在白光或黑光灯下，很容易观察到放大的缺陷显示。

## 三、实验设备及器材

YM-B 型渗透探伤试块，DPT-5 型着色渗透探伤试剂（清洗剂、渗透剂、显示剂），压力容器，丙酮，无水乙醇，脱脂棉等。

## 四、实验步骤

1. 用丙酮和无水乙醇的混合液（混合比为 1：1）将试件浸泡 30 分钟；
2. 用清洗剂清洗试件表面；
3. 用渗透剂喷涂试件表面，保持湿润约 5—10 分钟；
4. 擦去试件表面多余的渗透剂，用清洗剂清洗，或用水清洗；
5. 喷涂显示剂（显示剂请摇匀，喷涂距离 150mm—300mm）即能显示缺陷。

## 五、缺陷显示痕迹分类

痕迹类别	判 别 条 件
线性缺陷	长度与宽度之比大于 3 的缺陷显示痕迹
圆形缺陷	长度与宽度之比小于等于 3 的缺陷显示痕迹
横向缺陷	缺陷显示痕迹长轴方向与工件轴线或母线的夹角大于等于 30°
纵向缺陷	除按横向缺陷处理外的其他缺陷

六、数据处理

七、讨论、分析实验结果

# 焊缝射线透照缺陷分析、判断和评定实验

## 一、实验目的

1. 了解 GB3323 焊缝的质量分级规定及样板；
2. 理解对接焊缝的质量分级的原因；
3. 在最大黑度为 3.5 时的亮度下观察底片，对底片做出分析、判断、评定。

## 二、实验原理

对射线底片的评定即对底片进行分析、判断、评定并做出结论，是射线检测中的重要环节，根据评定的结论及被检工件的要求和相关标准，来决定工件是否合格、返修等。

根据 GB3323 中关于钢制压力容器对接焊缝透照缺陷等级评定的内容，根据缺陷的性质和数量，焊缝质量分为四级。I 级焊缝质量最高，依次下降。

焊接缺陷主要有焊接裂纹、未焊透、未熔合、夹渣、气孔等，这些缺陷不但减少焊缝截面，降低承载能力，还会产生应力集中，引起裂纹，缩短使用寿命，造成脆断等危害。

焊接裂纹主要有两类：一是热裂纹，经常发生在焊缝区，微观特征是沿晶界开裂。冷裂纹可能产生在焊缝区和热影响区，特征是无分支，通常为穿晶型，最主要、最常见的是延迟裂纹，即在焊后延迟一段时间才发生的裂纹。

焊接气孔的产生是由于在熔池液体金属冷却结晶时，产生气体，同时由于冷却结晶速度很快，气体来不及逸出熔池表面所造成的。焊接气孔主要有氢气孔，一氧化碳气孔和氮气孔等三种。

其它焊接缺陷如未焊透、未熔合、夹渣、咬边等主要是由于焊接规范不当，操作技术不良等造成的。

表 1 焊缝的质量分级

焊缝级别	要 求 内 容
I 级	不允许有裂纹、未熔合、未焊透和条状夹渣
II 级	不允许有裂纹、未熔合和未焊透
III 级	不允许有裂纹、未熔合以及双面焊或相当于双面焊的全焊透对接焊缝和加垫板的单面焊中的未焊透。不加垫板的单面焊中的未焊透允许长度按表二条状夹渣长度的 III 级评定。
IV 级	焊缝缺陷超过 III 级者

## 三、实验设备及材料

观片灯，焊接底片若干。

#### **四、实验步骤**

1. 打开观片灯；
2. 将底片依次放置于观片灯上，进行观察；
3. 记录观察到的缺陷形状；
4. 将底片放置好，避免污染，关机。

#### **五、实验结果分析、讨论**

# 外在因素对金属腐蚀速度影响的实验

## 一、实验目的

1. 了解金属电化学腐蚀原理；
2. 观察电化学腐蚀过程中的极化现象，加深对极化作用和去极化作用的理解；
3. 掌握溶液浓度、温度、搅拌速度等外在因素对金属腐蚀速度的影响。

## 二、实验原理

将碳钢试件与铂电极浸入相应的溶液中，通过连接导线与开关 K、微安表连成回路，如图 9-1 所示。合上开关 K，微安表上的指针将会偏转而显示流经回路的电流值。通过观察、比较微安表上显示的稳定电流值，就可以确定电化学腐蚀过程中的极化现象，以及溶液的不同浓度、温度、搅拌速度等外在因素对金属腐蚀速度的影响。

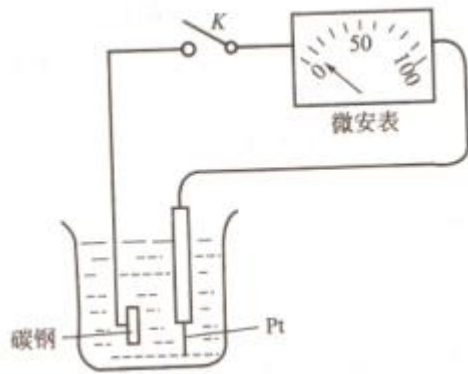


图 9-1 金属电化学腐蚀原理图

## 三、实验仪器及有关材料

1000mL 烧杯、酒精灯、微安表、铂电极、碳钢试件、搅拌装置、氯化钠等。

## 四、实验步骤

1. 极化现象的观察：将碳钢试件与铂电极浸入 3%氯化钠溶液中，通过连接导线与开关 K、微安表连成如图 1 所示的回路，合上开关 K，观察微安表上的指针显示流经回路的电流值具体变化情况。

2. 外在因素对金属腐蚀速度的影响

① 电解质溶液浓度的影响：将三套碳钢试件和铂电极组合成宏观电池，分别置于 0.3%、3%、30%氯化钠溶液中，观察稳定后其腐蚀电流  $I_c$  的大小。

② 温度的影响：将碳钢试件和铂电极组合成宏观电池置于另一 3%氯化钠溶液内，再用酒精灯加热溶液，观察温度升高后其腐蚀电流  $I_c$  的大小。

③ 溶液流速的影响：将同样的碳钢试件和铂电极对置于装有搅拌装置的 3%氯化钠溶液内，观察有搅拌和没有搅拌时溶液腐蚀电流  $I_c$  的变化情况。



## 五、实验记录

1. 极化现象的观察：

2. 外在因素对金属腐蚀速度的影响

① 电解质溶液浓度的影响：

② 温度的影响：

③ 溶液流速的影响：

## 六、实验结果分析、讨论

# 电涡流式传感器的特性实验

## 一、实验目的

1. 了解电涡流传感器的结构、原理、工作特性。
2. 通过实验研究不同的涡流感应材料对电涡流传感器特性的影响。

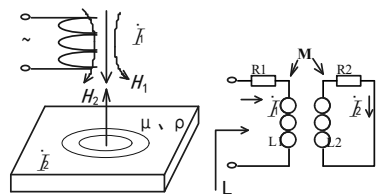


图1-1 电涡流作用原理和等效电路

## 二、实验原理

当通过金属体的磁通发生变化时，就会在导体中产生感生电流，这种电流在导体中是自行闭合的，这就是所谓的电涡流。

在图 1-1 中，一个扁平线圈置于金属导体附近，当线圈中通有交变电流  $I_1$  时，线圈周围就会产生一个交变磁场  $H_1$ ，置于这一磁场中的金属导体就产生电涡流  $I_2$ ，电涡流也就产生一个新磁场  $H_2$ ， $H_2$  与  $H_1$  方向相反，因而抵消部分原磁场，使通电线圈的有效阻抗发生变化，这一物理现象称为涡流效应。

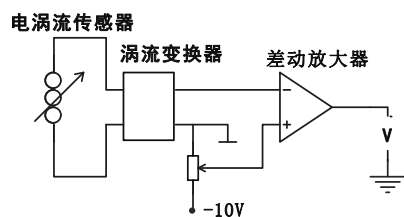


图1-2 电涡流传感器特性实验接线示意图

电涡流式传感器由平面线圈和金属涡流片组成，当线圈中通以高频交变电流后，与其平行的金属片上感应产生电涡流，电涡流的大小影响线圈的阻抗  $Z$ ，而涡流的大小与金属涡流片的电阻率、导磁率、厚度、温度以及与线圈的距离  $X$  有关。当平面线圈、被测体（涡流片）、激励源已确定，并保持环境温度不变，阻抗  $Z$  只与  $X$  距离有关。将阻抗变化经涡流变换器转换成电压  $V$  输出，则输出电压是距离  $X$  的单值函数。

## 三、实验所需部件

CSY10 传感器系统实验仪、电涡流线圈、金属涡流片、电涡流变换器、测微头、电压表、稳压器。

## 四、实验步骤：

1. 差动放大器增益置最小处（1 倍），调零。安装好电涡流线圈和金属涡流片，注意两者必须保持平行（必要时可稍许调整探头角度）。安装好测微头，按图 1-2 所示将电涡流线圈接入涡流变换器输入端，直流稳压电源置  $\pm 10V$  档。差动放大器在这里仅作为一个电平偏移电路。

2. 开启仪器电源，测微头位移将电涡流线圈与涡流片分开一定距离，此时输出端有一电压值输出。

3. 用测微头带动振动平台使平面线圈贴紧金属涡流片，调节电位器  $W_D$ ，使系统输出为零。

4. 旋动测微头使平面线圈离开金属涡流片，从电压表开始有读数起每移动  $0.25\text{mm}$  记录一个读数。将  $V$ 、 $X$  数据填入表格，作出  $V$ - $X$  曲线，求出线性范围和灵敏度。

5. 重复上述步骤分别对铁、铜、铝被测体进行测量，记录数据。

6. 分别找出各被测体的线性范围、灵敏度、最佳工作点（双向或单向），并进行比较。

位移 $mm$	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	1.75	1.5	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25	0
电压 $V$																	
位移 $mm$	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	1.75	1.5	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25	0
电压 $V$																	
位移 $mm$	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	1.75	1.5	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25	0
电压 $V$																	

## 五、实验报告要求及思考题

1. 实验目的、实验基本原理、主要实验步骤；

2. 根据数据表格，在同一坐标纸上作出三种材料的  $V$ - $X$  曲线；求出每种材料的线性范围、灵敏度和最佳工作点，并进行比较。

3. 用电涡流传感器测量物体的位移时，当被测材料不同时，要对传感器的哪些方面进行重新标定？

# 光纤传感器实验

## 一、实验原理

1. 反射式光纤位移传感器的工作原理如图 2-1 所示，光纤采用 Y 型结构，两束多模光纤一端合并组成光纤探头，在传感系统中，一支为接收光纤，另一支为光源光纤，光纤只起传输信号的作用。当光发射器发生的红外光，经光源光纤照射至反射体，被反射的光经接收光纤至光电转换器，光电元件将接收到的光信号转换为电信号。其输出的光强决定于反射体距光纤探头的距离，通过对光强的检测而得到位置量。

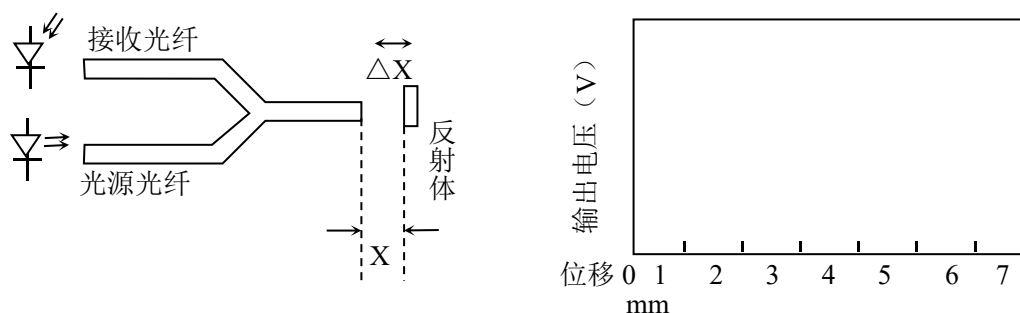


图 2-1 反射式光纤位移传感器原理图及输出特性曲线

2. 当光纤探头与反射面的相对位置发生周期性变化，光电变换器输出电量也发生周期变化，经  $V / F$  电路变换成方波频率信号输出。

## 二、实验所需部件

光纤、光电转换器、光电变换器、低频振荡器、电压 / 频率表、支架、反射片、测微头、测速电机及转盘、示波器。

## 三、实验步骤

1. 观察光纤结构：本仪器中光纤探头为半圆型结构，由数百根光导纤维组成，一半为光源光纤，一半为接收光纤。

2. 将原装在电涡流线圈支架上的电涡流线圈取下，装上光纤探头，探头对准镀铬反射片（即电涡流片）。

3. 振动台上装上测微头，开启电源，光电变换器  $V_o$  端接电压表。旋动测微头，带动振动平台，使光纤探头端面紧贴反射镜面（必要时可稍许调整探头角度），此时  $V_o$  输出为最小。然后旋动测微头，使反射镜面离开探头，每隔  $0.25\text{mm}$  读一次电压值填入下表，作出  $V-X$  曲线，曲线分前坡和后坡，通常测量是采用线性较好的前坡。

X	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	2.75	3.0	3.25	3.5	3.75	4.0
V																	

4. 振动实验：将测微头移开，振动台处于自由状态，根据 V—X 曲线选取前坡中点位置装好光纤探头。将低频振荡器输出接“激振 I”，调节激振频率和幅度，使振动台保持适当幅度的振动（以不碰到光纤探头为宜）。用电压 / 频率表 2K 档读出振动频率，还可用示波器观察  $V_o$  端电压波形

5. 转速测量：将光纤探头转过一个角度置于测速电机上方，并调整探头高度使其距转盘面 1mm 左右，光纤探头以对准转盘边缘内 3mm 处为宜。

6. 光电变换器 Fo 端分别接电压 / 频率表 2KHZ 档和示波器 DC 档。开启电机开关，调节转盘转速。

CSY10 型实验仪：用示波器观察输出波形并读出频率。

CSY10A、CSY10B 型实验仪：测转速时“光纤输出”“光电输出”须先接入“转速信号入”端，经整形电路输出，在“转速信号出”端口读取频率信号。

电机转速 = Fo 端方波频率除以 2（每周两个方波信号）。

#### 四、注意事项

1. 光电变换器工作时  $V_o$  最大输出电压以 2V 左右为好，如增益过高可能导致 FO 端无法读取频率值，可通过调节增益电位器控制。

2. 实验时请保持反射镜片的洁净与光纤端面的垂直度。

3. 工作时光纤端面不宜长时间直照强光，以免内部电路受损。

4. 注意背景光对实验的影响，光纤勿成锐角曲折。

5. 每台仪器的光电转换器都是与仪器单独调配的，请勿互换使用，光电转换器应与仪器编号配对，以保证仪器正常使用。

6. 光纤探头在支架上固定时应保持与转盘面平行，切不可相擦，以免使光纤端面受损。

7. 实验时应避免强光直接照射转盘盘面，以免造成测试误差。

#### 五、实验报告要求及思考题

1. 实验目的、实验基本原理、主要实验步骤。

2. 根据光纤传感器输出特性曲线，确定线性范围和灵敏度，并分析影响线性范围和灵敏度的因素。

3. 光纤传感器测量转速时，测量误差主要由哪些构成？

# 数字式热电阻温度变送器的调校实验

## 一、实验目的

1. 了解热电阻传感器测量温度的原理与电路结构；
2. 通过实验掌握数字式温度变送器的调校方法。

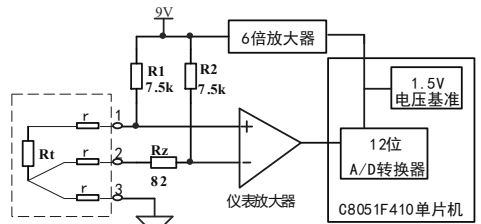


图3-1 热电阻温度变送器内部测量原理图

## 二、实验原理

### 1. 变送器的基本工作原理

热电阻是将温度变化转换为电阻值变化的一种传感器。最常用的热电阻有铂热电阻和铜热电阻，其中又以分度号 Pt100 和 Cu100 的热电阻应用最为广泛。由于特性方程是非线性的，所以在测得传感器的阻值  $R_t$  后，需要用分度表查出对应的温度值。

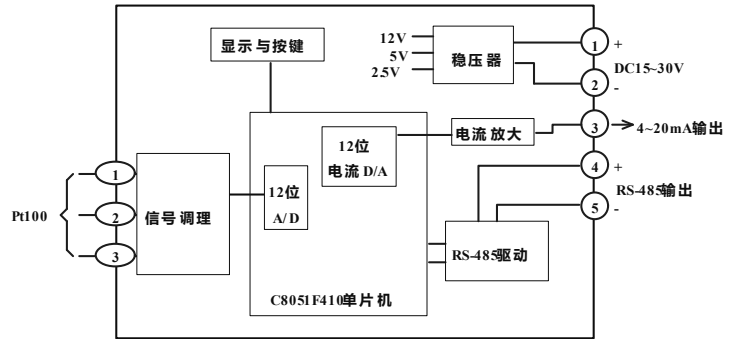


图3-2 温度变送器框图

热电阻传感器与变送器的接线方式有三种：两线制、三线制和四线制。为了抑制热电阻与变送器之间连接导线的电阻因环境温度变化引起的测量误差，工业上广泛采用三线制接法。

如图 3-1 所示，传感器电阻的变化经过不平衡电桥转换成电压变化，经仪表放大器进行放大，送单片机内部的 A/D 转换器转换成数字量，单片机内部运行的程序查分度表，得出温度，在面板上显示出来，同时通过 RS485 总线上传到 PC 机。

该变送器接 PT100 传感器的温度量程为  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，分辨力为  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

变送器的零点和量程调整可以通过 RS-485 总线在计算机上设置，也可以在仪表面板上进行。设新的测量范围为  $t_0\sim t_{\max}$ ，变送器将按下列标度变换公式输出模拟量：电流  $I_{\text{out}}=4\text{mA}+(t-t_0)/(t_{\max}-t_0)\times(20-4)$ ，电压  $U_{\text{out}}=I_{\text{out}}\times 250$ 。

### 2. 变送器的调校

变送器有两种模式：调校模式和工作模式。调校模式下修正系数为初始值 1 和 0，经过调校过程得到修正系数  $k$  和  $B$  后，切换到工作模式下，变送器用公式： $t=kT+B$  进行精度修正。

## 三、实验所需部件

TRC4 型智能温度变送器、数字万用表、精密电阻箱、RS485-RS232 转换器、计算机。

#### 四、实验步骤

1. 按图 3-2 接线， $R_t$ 用电阻箱代替，把变送器切换到调校模式。
2. 在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度测量范围内取 8 个温度 ( $t$ )，用电阻箱输入下列表中对应的电阻值 ( $R_t$ )，对每个点读取温度测量值 ( $T$ )，填于表中。
3. 用 Excel 求取线性拟合的修正系数  $k$  和  $B$ ，用附录介绍的方法设定这两个参数。

调校前

$t/^{\circ}\text{C}$	-40	0	100	200	300	400	500	600
$R_t/\Omega$	84.3	100.0	138.5	175.8	212.0	247.0	280.9	313.6
$T/^{\circ}\text{C}$								

4. 把变送器切换到工作模式，按步骤 2 的方法测量，填于表中。

调校后

$t/^{\circ}\text{C}$	-40	0	100	200	300	400	500	600
$R_t/\Omega$	84.3	100.0	138.5	175.8	212.0	247.0	280.9	313.6
$T/^{\circ}\text{C}$								

5. 零点和量程调整。把两个量程数据输入 PC 机界面上的相应部分，在每个量程内取 5 个点，用电压表测量输出电压  $U$ ，填于表中。

量程 1:  $t_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max}=200\text{ }^{\circ}\text{C}$

$t/^{\circ}\text{C}$	0	50	100	150	200
$R_t/\Omega$	100.0	119.4	138.5	157.3	175.8
$u/\text{V}$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
$U/\text{V}$					

量程 2:  $t_0=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max}=600\text{ }^{\circ}\text{C}$

$t/^{\circ}\text{C}$	200	300	400	500	600
$R_t/\Omega$	175.8	212.0	247.0	280.9	313.6
$u/\text{V}$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
$U/\text{V}$					

与理论输出电压  $u$  进行比较，求取量程调整后模拟量输出的修正系数  $K_o$  和  $B_o$ 。变送器中将下列公式进行输出修正： $U'_{out}=K_o U_{out}+B_o$ ， $I_{out}=U_{out}/250$ ，

式中  $U_{out}$  为修正前输出， $U'_{out}$  为修正后的输出。

### 五、实验报告要求及思考题

1. 实验目的、实验基本原理、实验步骤。
2. 根据每次测量得到的数据表格，在坐标纸上作出曲线，求出灵敏度和线性度。
3. 智能变送器有何特点？
4. 温度测量方法还有哪些？



# 毫伏变送器、数字调节器和执行器的调校实验

## 一、实验目的

1. 了解毫伏变送器、数字调节器和可控硅调压器的原理与电路结构；

2. 通过实验掌握毫伏变送器、数字调节器和电动执行器的调校方法。

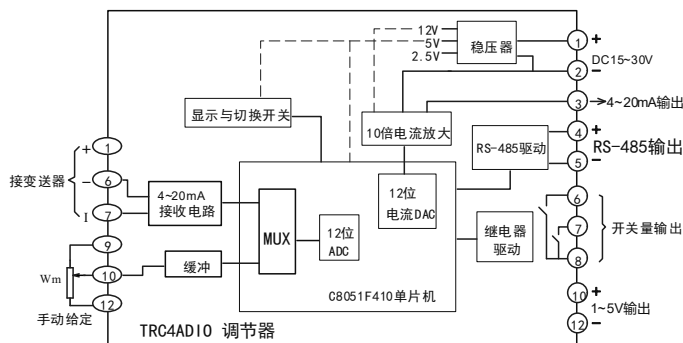


图4-1 数字调节器框图

## 二、实验原理

1. 毫伏变送器的电路原理 与图 3-1 类似，去掉电桥部分，测量范围为  $0\sim 60mV$ 。

2. 数字调节器的原理 如图 4-1 所示，可以和变送器相连，接收  $4\sim 20mA$  信号，具有电位器给定；具有 RS-485 通信功能，可以通过 PC 机进行远程控制。调节器面板上有两个显示器，显示内容可以根据需要设定。

3. 可控硅调压器的原理 接受调节器输出的  $4\sim 20mA$  信号，控制加在控制对象（电加热炉）上的交流电压，从而改变对象的电加热功率，实现执行器的功能。

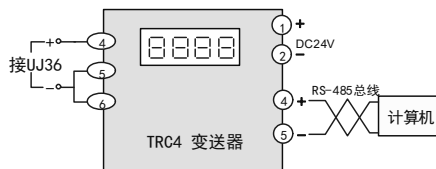


图4-2 毫伏变送器调校实验接线图

## 三、实验所需部件

TRC4 型智能温度变送器、TRC4AD10 型智能调节器、YGTY220 型可控硅调压器、数字万用表、UJ36 电位差计、RS485-RS232 转换器、计算机。

## 四、实验步骤

1. 毫伏变送器的调校 按图 4-2 所示接线，变送器置于“调校模式”。把 UJ36 电位差计校准，将“测量-输出”开关打到“输出”，选择好倍率，调节测量盘，产生需要的毫伏信号。这里 UJ36 作为标准毫伏信号发生器，在变送器量程范围内取 11 个点 ( $u_n$ )，读

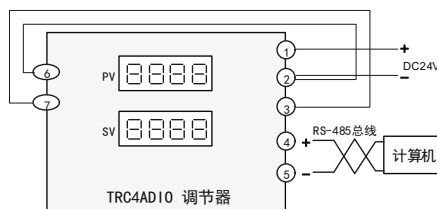


图4-3 调节器调校实验接线图

取测量值 ( $U_h$ ), 填于表中。用 Excel 算出修正系数  $K_h$  和  $B_h$ , 在面板上设定好这两个修正系数。

$u_h/mV$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$U_h/mV$													

2. 数字调节器的输入-输出调校 按图 4-3 接线, 调节器置于“调校”模式, 调节器开环运行, 在计算机上输入 1 个电流, 调节器的模拟量输出端输出对应的电流, 显示面板上的“PV”值处将显示测量到的电流, 理论上这两个数值应该相等。在  $4\sim 20mA$  范围内取 9 个点 ( $i_c$ ), 读取测量值 ( $I_c$ ), 填于下表中。算出修正系数  $K_c$  和  $B_c$ 。

$i_c/mA$	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00
$I_c/mA$									

3. 可控硅调压器的调校 按图 4-4 接线, 置调节器于“远程手动”模式 (在计算机界面上操作), 在计算机上输入电流数值, 调节器将输出对应的电流, 调压器的输出对应的从  $0V$  至  $220V$  变化。取 9 个点 ( $i_c$ ), 使用万用表的交流电压档测量调压器的输出 ( $U_o$ ), 填于下表中。

$i_c/mA$	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00
$U_o/V$									

### 五、注意事项

1. 必须检查接线无误后才能够接通电源;
2. 测量交流电压时, 一定要使用交流电压档, 并且注意操作安全。

### 六、实验报告要求及思考题

1. 实验目的、实验基本原理、实验步骤。
2. 根据每次测量得到的数据表格, 在坐标纸上作出曲线, 求出灵敏度和最大非线性误差。
3. 可控硅调压器的线性范围很窄的原因可能有哪些?

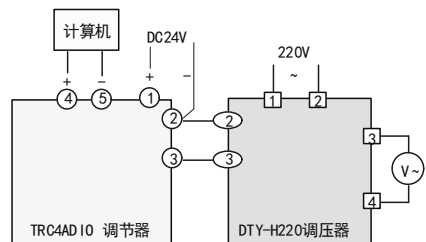


图4-4 执行器调校实验接线图

# 单回路控制系统的模型求取和非线性控制实验

## 一、实验目的

1. 了解响应曲线法求取控制对象模型的方法；
2. 掌握单回路控制系统各单元组合仪表的信号种类和连接方法；
3. 了解位式控制的控制过程和控制效果评价方法。

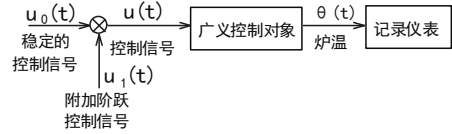


图5-1 飞升曲线测量方法示意图

## 二、实验原理

### 1. 电阻炉的数学模型的获取

实践证明，电阻炉是一个具有自衡能力的对象，可用一阶惯性环节加一个延迟环节来近似，其数学模型可表示为： $W_p(s)=K_p e^{-\tau s}/(T_p s+1)$ ，式中  $K_p$  为电阻炉的放大倍数，即电加热系数； $T_p$  为时间常数； $\tau$  为纯滞后时间，输入为加在电炉丝两端的电压，输出为炉温。为简化分析和实验的方便，把可控硅调压器与电阻炉合并，作为广义对象。可证明该广义对象仍然可以近似用一阶惯性环节加纯延迟环节表示： $W_0(s)=K_0 e^{-\tau s}/(T_0 s+1)$ 。参数  $K_0$ 、 $T_0$  和  $\tau$  可以用实验方法测得，即通过实验得到炉温的飞升曲线，再用作图法求出广义控制对象的特性参数。

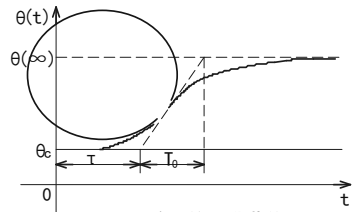


图5-2 炉温的飞升曲线

在实际测量时，一般只能在较窄的动态范围内进行，因为阶跃信号若从“零”开始常会有很大的非线性。但阶跃信号也不能取得过小，否则干扰对测量结果的误差的影响就相对增加。实验的示意框图如图 5-1 所示，在稳态信号  $u_0(t)$  作用下，系统有一稳定的输出  $\theta_c$ 。然后在输入端突加一幅度适宜的阶跃控制信号  $u_1(t)$ ，记录对应的输出变化  $\theta(t)$ 。得到如图 5-2 所示的飞升曲线。

放大倍数  $K_0$  为输出稳态值与输入阶跃信号幅值之比。在图 5-2 的飞升曲线的拐点 A 处作一切线，它与时间轴和输出稳态值各有一个交点，这两交点之间的切线段在时间轴上的投影即为时间常数  $T_0$ ，切线在时间轴上的截距就是对对象的纯滞后时间  $\tau$ 。

### 2. 电阻炉的开关控制(也叫位式控制)

在一些对超调和稳定性要求不高、工艺要求简单的温度控制系统中，可以采用开关控制方式。其控制方法是，当控制对象的温度超过给定值时，切断加热电源，控制对象的温度必然下降。当温度下降到低于给定值时，再接通加热电源，使温度上升。为了使得开关动作不致于太频繁而延长

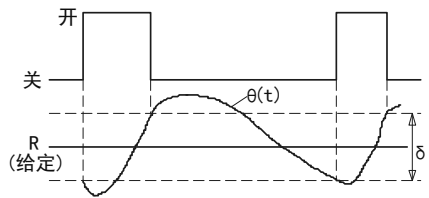


图5-3 开关控制的温度变化示意图

执行机构的使用寿命，常常人为地在给定值（R）附近加一个失灵区（也叫回差，用 $\delta$ 表示），当温度高于  $R+\delta/2$  时，开关断开，停止向加热炉提供能量，对象降温。当温度低于  $R-\delta/2$  时，开关接通，向加热炉提供能量，对象升温。图 5-3 为被控对象在开关控制规律作用下的变化情况。

### 三、实验所需部件

TRC4 型智能温度变送器、TRC4ADIO 型智能调节器、YGT220 型可控硅调压器、数字万用表、UJ36 电位差计、RS485-RS232 转换器、计算机。

### 四、实验步骤

1. 按图 5-4 接线，温度变送器置于“工作模式”，在 PC 机监控界面上设置调节器于“远程手动”模式。

在 PC 机上“输出电流”处输入起始电流  $I_0=6\text{mA}$ ，调压器输出微弱电压，待炉温趋于稳定，记录下此时的温度  $\theta_0$ 。

改变调节器的输出电流，增大  $1\text{mA}$  或  $2\text{mA}$ ，则电阻炉升温，每 5 秒记录一次温度值  $\theta$ ，直到炉温达到稳定值  $\theta_c$ 。则广义对象的放大倍数为： $K_0$ =温度增加值占温度量程的百分数/控制器输出电流对应的变化量。即：

$$K_0 = \frac{(\theta_c - \theta_0)/1000}{\Delta I / (I_{\max} - I_0)}$$

$\Delta I$  是电流阶跃量，1000 是最高温度， $I_{\max}$  为加热到  $1000^\circ\text{C}$

所需的电流，大概为  $13\text{mA}$ 。

绘制出炉温的飞升曲线。用作图法求取广义对象的  $T_0$  和  $\tau$  值。

2. 接线不变，温度变送器和调节器的设置不变，在 PC 机监控界面上设置调节器工作于“位控”模式，输入给定温度（在当前温度上加  $50^\circ\text{C}$ ）和回差（ $\delta=2^\circ\text{C}$ ），每 5 秒记录一个温度值，直到开关动作两个周期，并记录下开关动作的时间间隔和温度的最大、最小值。坐标纸上绘制“温度-时间”曲线，并标出开关动作的时间

3. 重新输入给定温度（在当前温度上加  $50^\circ\text{C}$ ）和回差（ $\delta=10^\circ\text{C}$ ），重复步骤 2。

### 五、实验报告要求及思考题

1. 实验目的、实验基本原理、实验步骤。
2. 根据测量得到的数据表格，在坐标纸上作出曲线，求出对象的数学模型。
3. 在求取控制对象的飞升曲线时，为什么初始温度不能从常温（即控制器输出为 0）开始？
4. 画出图 5-4 的控制系统原理框图，在图上标出各物理量，简要叙述工作原理。
5. 总结位式控制的特点，设定控制回差的大小有何依据？

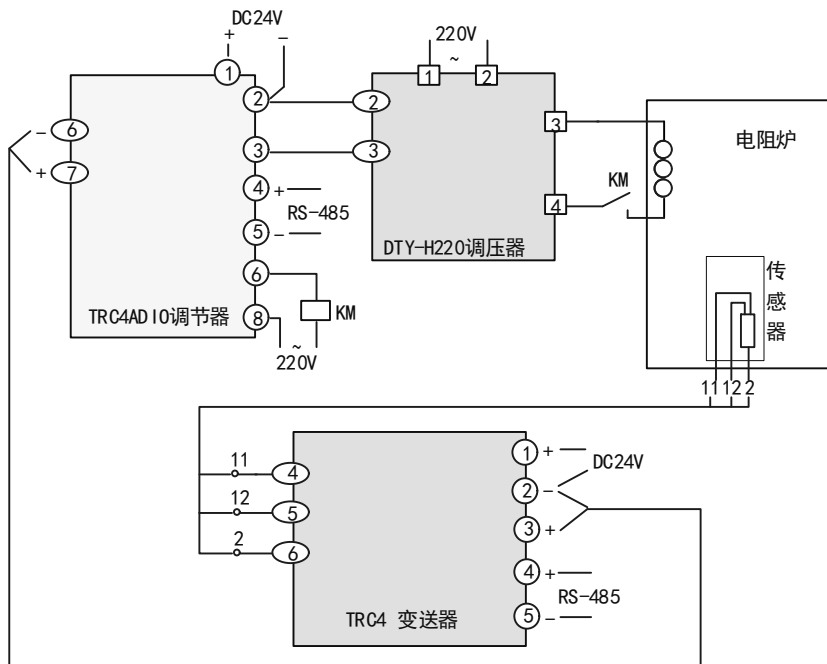


图5-4 单回路控制系统接线图

# 单回路控制系统的控制参数整定实验

## 一、实验目的

1. 理解单回路计算机控制系统的结构和工作原理；
2. 掌握数字 PID 控制算法；
3. 掌握数字 PID 调节器的参数整定方法。

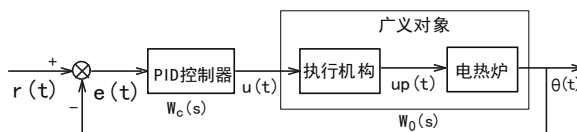


图6-1 典型PID温度控制系统的结构

## 二、实验原理

### 1. 数字 PID 控制算法

图 6-1 为典型的 PID 控制系统的结构图， $r$  为给定值， $e=r-\theta$  为温度偏差， $u$  为 PID 控制器输出的控制量， $W_0$  为广义对象传递函数， $u_p$  为执行机构输出。

PID 控制器的传递函数为： $W_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)$ ，比例项用于纠

正偏差；积分项用于消除系统的稳态误差；微分项用于减小系统的超调量，增加系统稳定性。PID 控制器的性能就取决于  $K_p$ 、 $T_I$  和  $T_D$  这三个系数。因此，系统投运前必须整定好这三个参数。

对模拟 PID 控制算式进行离散化，就可以得到数字式 PID 算式，理论分析和实践证明，采用变速积分的 PID 算法能有效抑制积分饱和，还可以有效地消除系统静差。这种算式的基本思想是，在偏差大于某个范围时 ( $|e_k| > rB_2$ )，积分增量不累加；在偏差小于某个范围时 ( $|e_k| \leq rB_1$ )，积分增量完全累加；偏差范围在  $rB_1$  和  $rB_2$  之间时，积分增量按均匀的速度累加。具体的算式为：

$$\begin{cases} \Delta u_k = K_p(e_k - e_{k-1}) + N_k K_I e_k + K_D(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \\ u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \\ K_I = K_p T / T_I, \quad K_D = K_p T_D / T \\ N_k = \begin{cases} 0 & \text{当 } |e_k| > rB_2 \text{ 时} \\ (rB_2 - |e_k|) / (rB_2 - rB_1) & \text{当 } rB_1 < |e_k| \leq rB_2 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } |e_k| \leq rB_1 \end{cases} \end{cases}$$

式中， $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  分别为调节器的比例、积分、微分系数， $T$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  分别为采样周期、微分时间常数、积分时间常数。 $\Delta u_k$  为本次输出控制量的增量， $u_k$  为本次控制量， $u_{k-1}$  为上次计算所得的控制量， $e_k$  为本次的偏差（偏差=给定值-测量值）， $e_{k-1}$  为上次偏差， $e_{k-2}$  为更上次的偏差， $r$  为给定值， $N_k$  为变速积分系数。

## 2. 数字 PID 调节器的参数整定

如果采样周期  $T$  足够小, 比对象的时间常数小得多, 这样的数字调节器与模拟 PID 调节器的性能很接近, 因而可以用模拟 PID 调节器的参数整定方法对数字 PID 控制器的参数进行整定, 常用的整定方法有扩充响应曲线法和扩充临界比例度法。

(1) 扩充响应曲线法的整定步骤为: 利用实验四所得结果, 广义对象的数学模型近似表示为:  $W_0(s)=K_0e^{-\tau s}/(T_0s+1)$ , 根据这三个参数 ( $K_0$ 、 $T_0$  和  $\tau$ ), 可以采用“扩充响应曲线法”求取初始参数如下:  $T=0.05\tau$ ,  $K_p=1.15 K_0T_0/\tau$ ,  $T_i=2\tau$ ,  $T_D=0.45\tau$ 。

(2) 扩充临界比例度法: 选择一个足够短的采样周期 (小于对象纯滞后时间的  $1/10$ ), 让调节器作纯比例控制 ( $T_i=\infty, T_D=0$ ), 让比例系数从一个较小的值逐渐增大, 直至被控量出现等幅振荡, 记录下此时的比例系数  $K_c$  (称为临界比例系数) 和振荡周期  $T_c$  (称为临界振荡周期), 然后按下列公式求取各参数:  $T=0.014T_c$ ,  $K_p=0.63K_c$ ,  $T_i=0.49T_c$ ,  $T_D=0.14T_c$ 。

## 三、实验所需部件

TRC4 型智能温度变送器、TRC4ADIO 型智能调节器、YGT220 型可控硅调压器、数字万用表、UJ36 电位差计、RS485-RS232 转换器、计算机

## 四、实验步骤

1. 按图 5-4 接线, 温度变送器置于“工作模式”。在 PC 机监控界面上设置调节器于“本地自动”模式。

### 2. 扩充响应曲线法整定实验

利用实验四所得结果, 计算出  $T$ 、 $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_D$ , 记录下这一组初始参数。在相应位置输入这四个参数, 启动界面上绘制曲线功能。在“给定值”处输入一个给定量 (该给定量可取当前温度数值加上  $100^\circ\text{C}$ , 但最高不能超过  $600^\circ\text{C}$ ), 观察响应曲线变化两个周期, 记录最大超调量 ( $\delta\%$ )、衰减比、振荡周期。衰减比 ( $\varphi$ ) 定义为: (第一个波峰的峰值-给定值) / (第二个波峰峰值-给定值)。根据控制曲线的形状调整控制参数, 直到出现  $\varphi\approx 4:1$ 、 $\delta\%\leq 5\%$ 。每调整一次都要记录下控制参数和性能指标数值。在参数调整过程中, 注意观察 PID 各参数对系统性能的影响:

(1) 增大  $K_p$ , 加快系统的响应, 减小静差, 但超调量增大, 稳定性变差。

(2) 增大  $T_i$ , 减弱积分作用, 超调量减小, 系统稳定性更好, 但消除系统静差的时间变长。

(3) 增大  $T_D$ , 增强微分作用, 减小了超调量, 稳定性更好, 但对扰动和干扰更灵敏。

记录下最终的参数, 并重新输入一个给定值 (在原给定值处加/减幅度不超过  $50^\circ\text{C}$ ), 观察响应曲线两个周期, 记录最大超调量 ( $\delta\%$ )、衰减比、振

荡周期。

### 3. 扩充临界比例度法整定实验

输入初始参数： $T=1s$ 、 $K_p=10$ 、 $T_I=4000$ 、 $T_D=0$ ，输入一个给定量（该给定量可取当前温度数值加上  $100^{\circ}C$ ，但最高不能超过  $600^{\circ}C$ ），观察响应曲线变化趋势，逐渐增大  $K_p$ ，直至出现等幅振荡曲线为止。记录  $K_c$  和  $T_c$ ，利用前面所述公式计算出四个参数，记录这些参数。

【注】调整  $K_p$  的方法可采取“逐次逼近”法，如果出现发散振荡，则按“逐次逼近”法相应减小。

输入参数，重新输入一个给定值（在原给定值处加/减幅度不超过  $50^{\circ}C$ ），观察响应曲线两个周期，记录最大超调量（ $\delta\%$ ）、衰减比、振荡周期。

如果性能指标不满足要求（ $\varphi \approx 4:1$ 、 $\delta\% \leq 5\%$ ），则继续按步骤 2 所述参数调整的法作调整，并作好记录。

## 五、注意事项

1. 控制系统的硬件连接、变送器、调节器的工作模式在整个参数整定过程中都不要改变。

2. 参数整定过程比较费时，分两个大组，每组同学做一种整定方法，做完后再对（同一控制对象的）参数进行对比。

## 六、实验报告要求及思考题

1. 实验目的、实验基本原理、实验步骤。
2. 根据数据表格作出曲线，求出整定参数。
3. 画出控制系统结构图，作简单的理论分析。
4. 各种参数整定方法的优缺点或适用场合。
5. 如果调节器只是作为数据输入输出用，控制算法在计算机上实现。这种情况下，数据通信的速度对控制系统的性能将会产生较大影响，这种影响主要体现在哪方面呢？如何减小这种影响？