

东南大学自动检测技术实验室

# 实 验 报 告

课程名称： 自动检测技术

实验名称： 差动变压器的性能实验

电容式传感器位移实验

压电式传感器振动测量实验

电涡流传感器位移实验

院（系）： 自动化 专 业： 自动化

姓 名： 陈鲲龙 学 号： 08022311

实验时间： 2024/12/07 评定成绩：                     

教师：

## 实验六 差动变压器位移性能实验

### 一. 实验目的

了解差动变压器的工作原理和特性。

### 二. 基本原理

差动变压器的结构如图 2—1 所示，由一个一次绕组 1 和二个二次绕组 2、3 及一个衔铁 4 组成。差动变压器一、二次绕组间的耦合能随衔铁的移动而变化，即绕组间的互感随被测位移改变而变化（衔铁的移动即被测位移）。实际应用中把二个二次绕组反向串接（\* 同名端相接），以差动电势输出，所以把这种传感器称为差动变压器式电感传感器，通常简称差动变压器。

当差动变压器工作在理想情况下（忽略涡流损耗、磁滞损耗和分布电容等影响），它的等效电路如图 2—2 所示。图中  $U_1$  为一次绕组激励电压， $M_1$ 、 $M_2$  分别为一次绕组与两个二次绕组间的互感， $L_1$ 、 $R_1$  分别为一次绕组的电感和有效电阻， $L_{21}$ 、 $L_{22}$  分别为两个二次绕组的电感， $R_{21}$ 、 $R_{22}$  分别为两个二次绕组的有效电阻。

当衔铁处于中间位置时，两个二次绕组互感相同，因而由一次绕组激励  $U_1$  引起的感应电动势相同。由于两个二次绕组反向串接，所以差动输出电动势为零。

当衔铁移从中间位置向两边移动时，互感  $M_1$ 、 $M_2$  大小不同，因而二次绕组  $L_{21}$ 、 $L_{22}$  的内感应电动势大小不同，这时差动输出电动势不为零。

在传感器的量程内，衔铁从中间位置位移越大，差动输出电动势就越大。通过差动变压器输出电动势的大小和相位可以知道衔铁位移量的大小和方向。

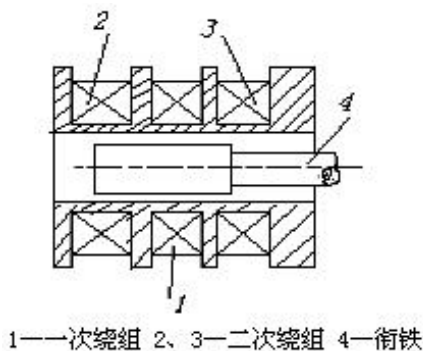


图 2-1 差动变压器的结构示意图

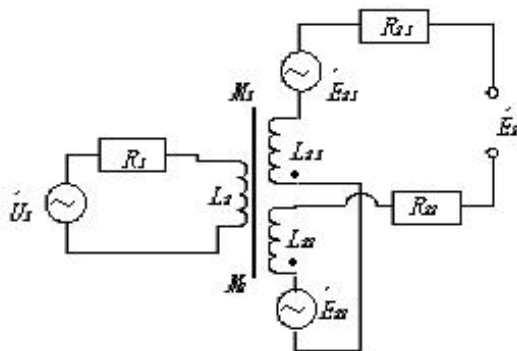


图 2-2 差动变压器的等效电路图

由图 2—2 可知一次绕组的电流为：

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

二次绕组的感应电动势为：

由于二次绕组反向串接，所以  $\dot{E}_{21} = -j\omega M_1 \dot{I}_1$ ， $\dot{E}_{22} = -j\omega M_2 \dot{I}_1$ ，输出总电动势为：

$$\dot{E}_2 = -j\omega(M_1 - M_2) \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

其有效值为：

$$E_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)U_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

差动变压器的输出特性曲线如图 2—3 所示，图中  $E_{21}$ 、 $E_{22}$  分别为两个二次绕组的输出感应电动势， $E_2$  为差动输出电动势， $x$  表示衔铁偏离中心位置的距离。其中  $E_2$  的实线部分表示理想的输出特性，而虚线部分表示实际的输出特性。 $E_0$  为零点残余电动势，这是由于差动变压器制作上的不对称以及铁心位置等因素所造成的。零点残余电动势的存在，使得传感器的输出特性在零点附近不灵敏，给测量带来误差，此值的大小是衡量差动变压器性能好坏的重要指标。

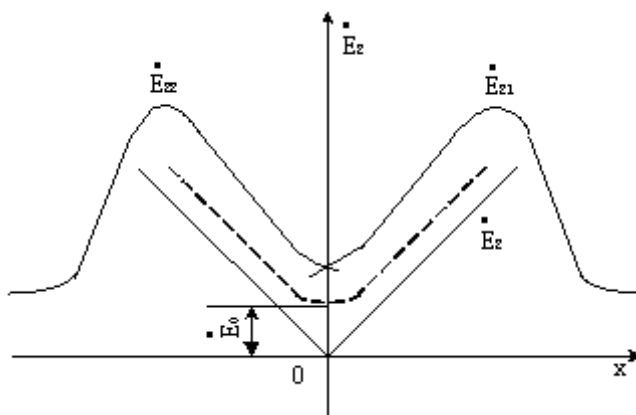


图 2-3 差动变压器输出特性

为了减小零点残余电动势可采取以下方法：

1. 尽可能保证传感器几何尺寸、线圈电气参数及磁路的对称。磁性材料要经过处理，消除内部的残余应力，使其性能均匀稳定；2. 选用合适的测量电路，如采用相敏整流电路。既可判别衔铁移动方向又可改善输出特性，减小零点残余电动势；3. 采用补偿线路减小零点残余电动势。图 2—4 是其中典型的几种减小零点残余电动势的补偿电路。在差动变压器的线圈中串、并适当数值的电阻电容元件，当调整  $W1$ 、 $W2$  时，可使零点残余电动势减小。

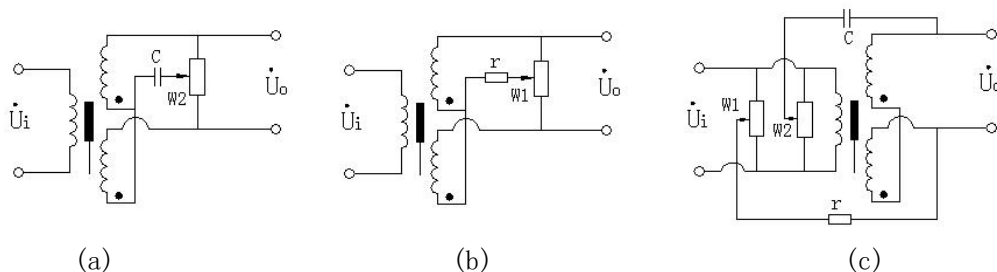


图 2-4 减小零点残余电动势电路

### 三. 实验器材

主机箱（±15V 直流稳压电源、音频振荡器）、差动变压器、差动变压器实验模板、测微头、双踪示波器（虚拟示波器）、导线等。

#### 四. 实验步骤

##### 1. 测微头的组成与使用

测微头组成和读数如图 2-5。

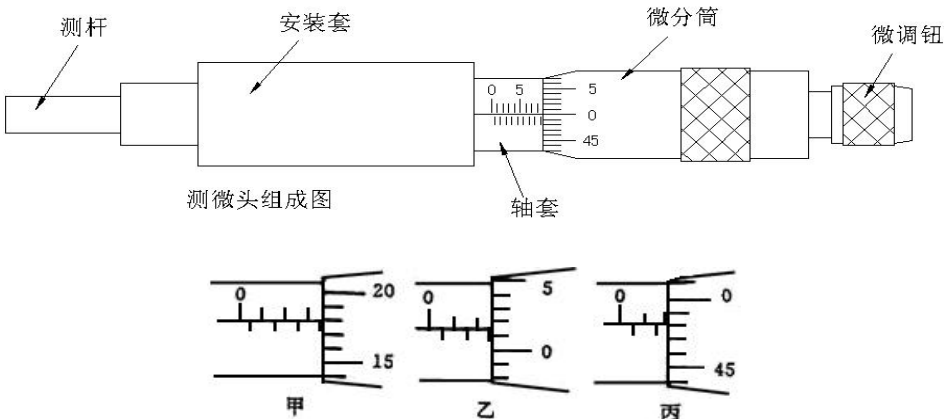


图 2-5 测位头组成与读数

测微头组成：测微头由不可动部分安装套、轴套和可动部分测杆、微分筒、微调钮组成。

测微头的安装套便于在支架座上固定安装测微头；轴套上的主尺有两排刻度线，上面标有数字的是整毫米刻线(1mm / 格)，下面是半毫米刻线(0.5mm / 格)；微分筒前部圆周表面上刻有 50 等分的刻线(0.01mm / 格)。

用手旋转微分筒或微调钮时，测杆就沿轴线方向进退；微分筒每转过 1 格，测杆沿轴方向位移 0.01mm，这也叫测微头的分度值；微分筒转动一圈，测杆沿轴方向位移 0.5mm（微分筒上有 50 等分刻度）。

测微头读数方法：先读轴套主尺上露出的刻度数值，注意半毫米刻线；再读与轴套主尺横线对准的微分筒上数值，1 / 10 分度即 0.001mm 需要估读。如图 2-5 甲读数为 3.678mm（轴套 3.5mm + 微分筒 17.8 × 0.01mm = 3.678mm，17.8 中的 0.8 是估读的），不是 3.178mm；遇到微分筒边缘前端与主尺上某条刻线重合时，应看微分筒的示值是否过零，如图 2—5 乙微分筒的示值已过零，则读 2.515mm（轴套 2.5mm + 微分筒 1.5 × 0.01mm = 2.515mm，1.5 中的 0.5 是估读的）；如图 2—5 丙微分筒的示值未过零，则不应读为 2mm，读数应为 1.982mm（轴套 1.5mm + 微分筒 48.2 × 0.01mm = 1.982mm，48.2 中的 0.2 是估读的）。

测微头使用：测微头在实验中是用来产生位移并指示出位移量的工具。一般测微头在使用前，首先转动微分筒到 10mm 处(为了保留测杆轴向前、后位移的余量)，再将测微头轴套上的主尺横线面向自己安装到专用支架座上，移动测微头的安装套(测微头整体移动)使测杆与被测体连接并使被测体处于合适位置(视具体实验而定)时再拧紧支架座上的紧固螺钉。当转动测微头的微分筒时，被测体就会随测杆而位移。

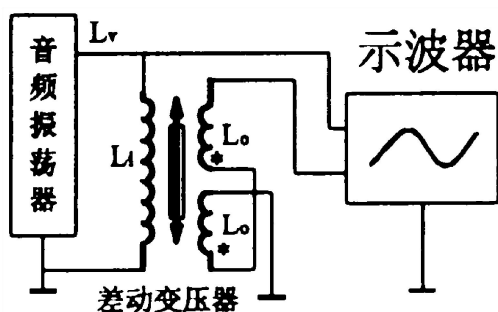
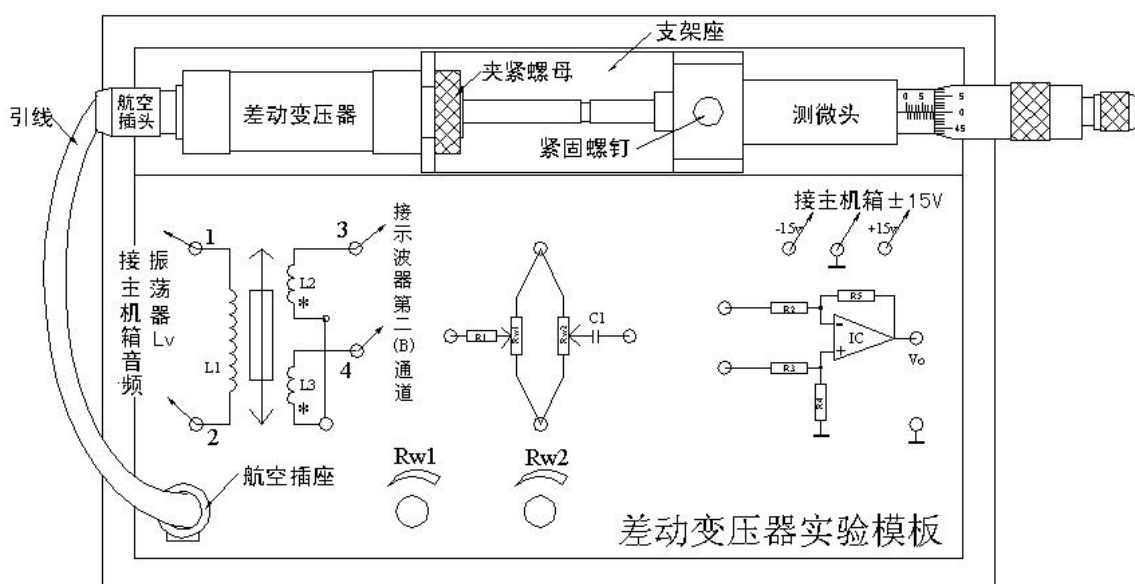


图 2-6 差动变压器性能实验原理图



- \* 示波器第一 (A) 通道测量LV信号 $V_{p-p}=2V$
- \* 频率表测量LV信号 $f=4-5KHz$

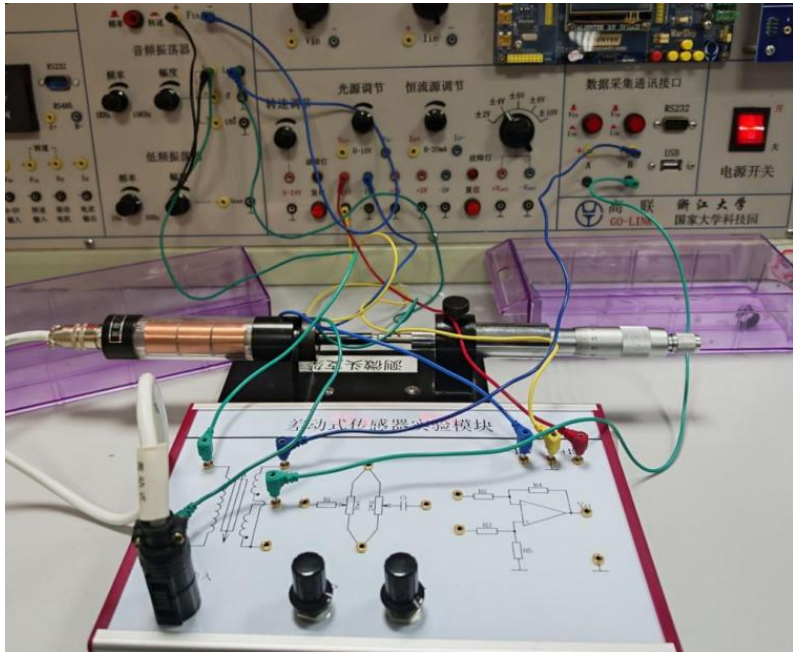
图 2-7 差动变压器性能实验模板、接线图

## 2. 差动变压器实验

(1) 图 2-6 为差动变压器性能实验原理图。按图 2-7 接线。

将差动变压器和测微头安装在测微头支架座上，测微头与变压器铁芯相接。L1 为初级线圈；L2、L3 为次级线圈；“\*”号为同名端标识。

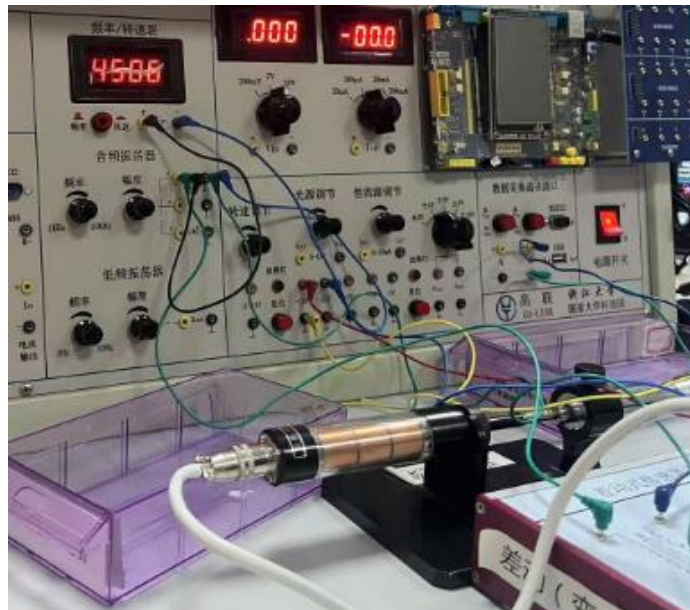
实际接线图：



(2) 差动变压器的原边  $L_1$  的激励电压从主机箱中音频振荡器的  $L_v$  端子引入,  $L_v$  信号同时接主机箱频率表输入端  $F_{in}$  及示波器第一 (A) 通道。

检查接线无误后合上总电源开关, 调节音频振荡器  $L_v$  的频率为  $4 \sim 5\text{KHz}$  (用主机箱频率表监测); 调节输出幅度峰峰值为  $V_{p-p}=2\text{V}$  (用示波器监测: X 轴为  $0.2\text{ms/div}$ )。

取  $4506\text{Hz}$ :



(3) 旋转测微头使其刻度 (读数) 大约处于中间位置 ( $10\text{mm}$ ), 松开测微头的安装紧固螺钉, 左右移动测微头使差动变压器的次级输出 (示波器第二通道) 波形  $V_{p-p}$  为较小值 (变压器铁芯大约处在中间位置)。

拧紧紧固螺钉, 仔细调节测微头的微分筒使差动变压器的次级输出波形  $V_{p-p}$  为最小值 (零

点残余电压），记录测微头读数，此处定为位移零点。

这时可以旋转测微头左右位移，假设其中一个方向为正位移，则另一个方向为负位移。

(4) 从位移零点（次级输出波形  $V_{p-p}$  最小值处）向一个方向旋转测微头的微分筒，每隔  $\Delta X = 0.2\text{mm}$  从示波器上读出输出电压  $V_{p-p}$  值（取 30 个点），填入表 2-1。

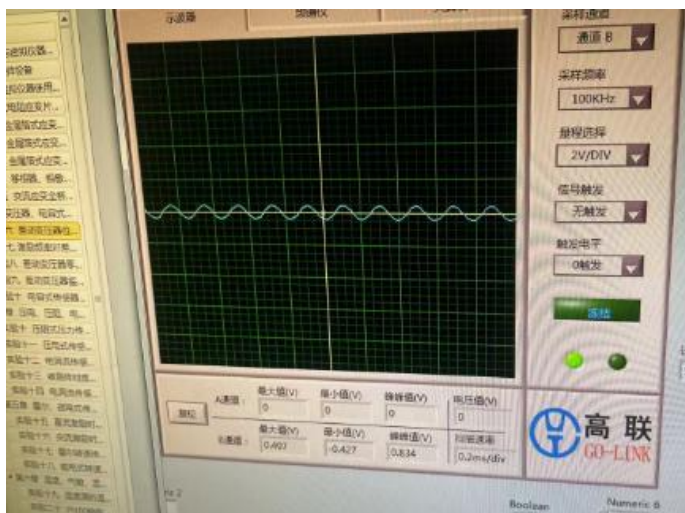
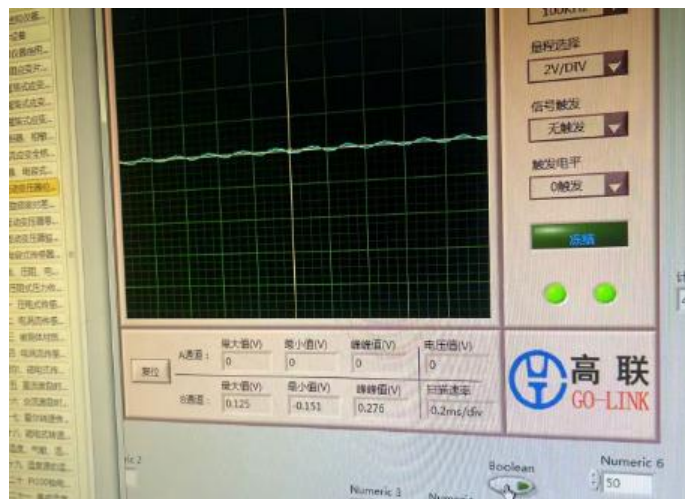
一个方向结束后，再将测位头退回到  $V_{p-p}$  最小值处，此处作为新的位移零点，反方向做相同的位移实验。

当一个方向行程实验结束，做另一个方向时，测微头回到  $V_{p-p}$  最小值处，这时它的位移读数有变化（没有回到原来起始位置）是正常的，做实验时位移取相对变化量  $\Delta X$  为定值，与测微头的起始点定什么位置没有关系，只要中途测微头微分筒不回调就不会引起机械回程误差。

(5) 从零点决定位移方向后，测微头只能按所定方向调节位移，中途不允许回调，否则，由于测微头存在机械回差而引起位移误差。

实验时每点位移量须仔细调节，绝对不能调节过量而回调，如过量则只好剔除这一点继续做下一点实验，或者回到零点重新做实验。

部分实验过程图片：



3. 实验过程中注意差动变压器次级输出的最小值即为差动变压器的零点残余电压。

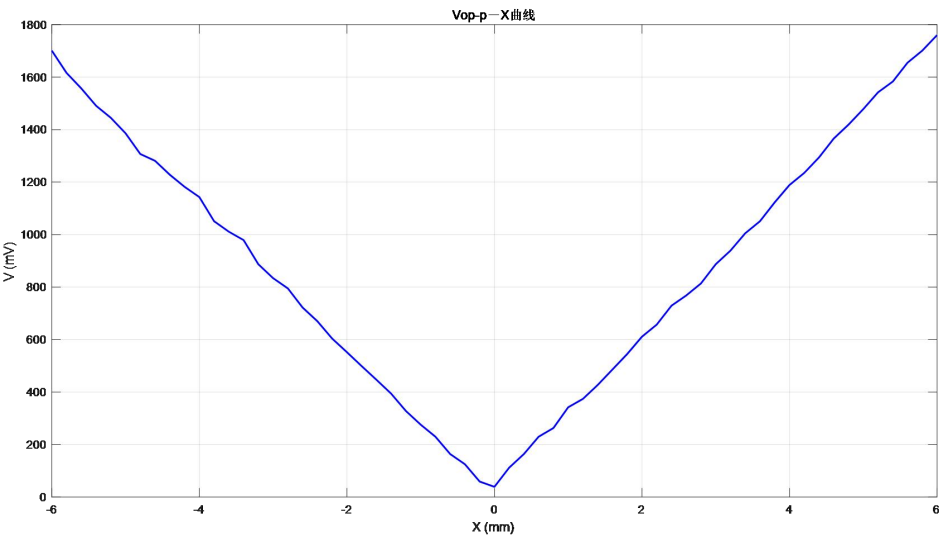
实验完毕，关闭电源。

根据表 2-1 画出  $V_{op-p}-X$  曲线，作出位移为 $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 3\text{mm}$  时的灵敏度和非线性误差。

表 2-1

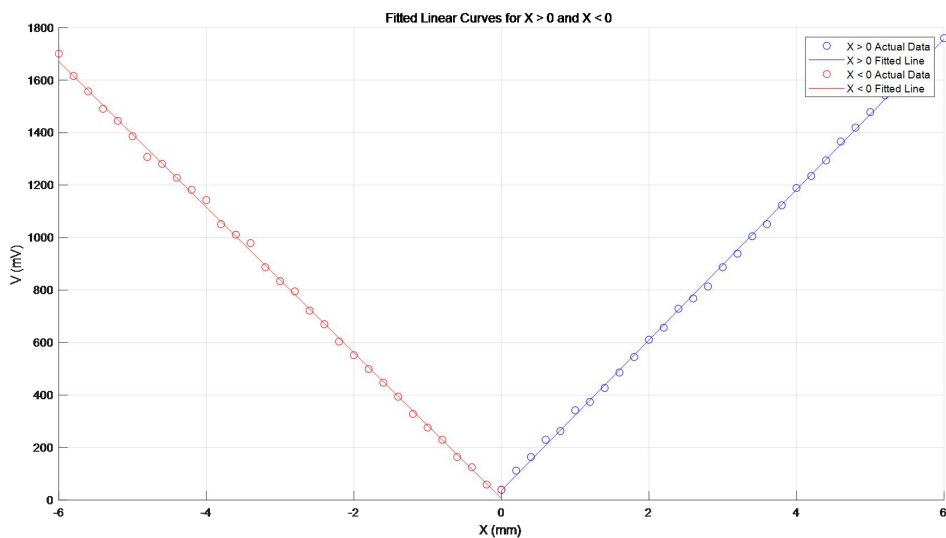
X(mm)	-6	-5.8000	-5.6000	-5.4000	-5.2000	-5	-4.8000	-4.6000	-4.4000	-4.2000	-4	-3.8000	-3.6000	-3.4000	-3.2000	0
	1701	1616	1557	1491	1445	1386	1307	1281	1228	1182	1143	1051	1.0110e+...	979	887.0000	0
V(mv)	-3	-2.8000	-2.6000	-2.4000	-2.2000	-2	-1.8000	-1.6000	-1.4000	-1.2000	-1	-0.8000	-0.6000	-0.4000	-0.2000	0
	834	795	722.0000	670	604.0000	552	499.0000	447.0000	394.0000	328.0000	276	230.0000	164.0000	125.0000	59.0000	39
	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1	1.2000	1.4000	1.6000	1.8000	2	2.2000	2.4000	2.6000	2.8000	3	0
	112.0000	164.0000	230.0000	263.0000	342	374.0000	427.0000	486.0000	545	611	657.0000	729	768.0000	814	887	0
	3.2000	3.4000	3.6000	3.8000	4	4.2000	4.4000	4.6000	4.8000	5	5.2000	5.4000	5.6000	5.8000	6	0
	939.0000	1005	1051	1123	1189	1235	1294	1366	1419	1478	1542	1583	1655	1701	1760	0

$V_{op-p}-X$  曲线绘制如下：



直线拟合&灵敏度、非线性误差计算&位移为 $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 3\text{mm}$  时的灵敏度和非线性误差：





```
Sensitivity灵敏度:
Positive part (X > 0): 286.5746 mV/mm
Negative part (X < 0): -277.373 mV/mm
X = +1mm: 303 mV/mm
X = -1mm: -315 mV/mm
X = +3mm: 282.6667 mV/mm
X = -3mm: -289 mV/mm
Nonlinear error非线性误差:
Positive part max error: 1.4568 %
Negative part max error: 1.8775 %
X = +1mm: 1.0902 %
X = -1mm: -0.43884 %
X = +3mm: -0.54544 %
X = -3mm: -0.27928 %
```

*fx* >>

## 五. 思考题

### 1. 试分析差动变压器与一般电源变压器的异同？

差动变压器与一般电源变压器在结构、工作原理、功能和应用场景上存在显著差异，同时也有一些相似点：相同点：两者均基于电磁感应原理，通过一次线圈和二次线圈之间的磁场耦合进行能量传递。基本组成部分包括一次绕组、二次绕组和铁芯，铁芯通常由高磁导率材料制成以减少磁路损耗。都依赖交流输入信号以产生感应电压；差异点：1.功能和用途，差动变压器主要用于测量位移、应变等物理量的变化，属于传感器或仪器元件；而一般电源变压器用于

改变电压和电流，满足电力传输与分配需求；2.输出特性，差动变压器的输出电压与机械位移成比例，是一种小信号（通常为毫伏级别）；而电源变压器输出电压稳定，通常用于提供大功率电能；3.输入信号，差动变压器需要高频交流载波（例如正弦波）作为输入信号，而电源变压器通常直接连接到市电（50/60Hz）；4.结构设计，差动变压器具有两个对称绕组，线圈分布在一个可移动的铁芯两侧；而电源变压器的初次级绕组固定，没有移动部件；5.工作模式，差动变压器采用差动输出方式，输出电压是两个绕组电压的差值，反映机械量的变化；电源变压器采用单端输出，一次侧与二次侧通过变比转换电压；6.应用场景，差动变压器广泛应用于工业自动化中的位移传感器、压力测量及精密仪器中；而电源变压器主要用于电力传输、家用电器供电等场景；7.动态响应，差动变压器适用于高动态变化的场景，频率响应较高；而电源变压器频率响应较低，针对工频进行优化设计。

总结，差动变压器如线性可变差动变压器（LVDT），通过铁芯位置变化导致感应电压的不对称变化，其输出信号与位移成正比，适合作为线性位移传感器，优点包括高分辨率、响应快、无接触测量等，但需要精密电路处理；电源变压器则以高效、稳定传递电能为目标，适用于升压或降压场景，优点是功率大、结构简单、耐用性强，但无法用于精确测量物理量。

## 2. 用直流电压激励会损坏传感器。为什么？

用直流电压激励差动变压器传感器可能会损坏的原因如下：1.铁芯磁化饱和，差动变压器设计用于交流电压激励，如果使用直流电压，铁芯将会被持续磁化，导致铁芯处于磁饱和状态。饱和后，铁芯的磁导率大幅下降，线圈的电感特性改变，最终影响传感器的正常工作，并可能导致铁芯局部过热；2.绕组过热，直流电流通过线圈时，线圈的电阻会消耗能量并转化为热量，由于没有交流电的周期性零点，直流会产生持续的热量积累，可能导致绕组过热甚至烧毁；3.信号处理电路损坏，差动变压器通常与交流信号处理电路（如解调器和放大器）配合使用，这些电路专为交流信号设计。如果输入直流信号，会导致电路元件（如电容或变压器）工作异常甚至损坏；4.输出信号失效，差动变压器基于感应电压的差动输出，直流电压无法产生感应电压，导致输出信号丢失或失效，传感器失去功能；5.设计参数不匹配，差动变压器的材料和结构设计都是针对交流特性优化的，包括绕组分布、铁芯材料和磁路特性。如果施加直流激励，系统无法达到设计的工作模式，可能会因工作条件超出设计范围而损坏。

综上，差动变压器传感器的工作原理和材料特性决定了它只能使用交流电压激励，使用直流电压激励不仅会损坏传感器，还会导致其完全失效。

### 3. 如何理解差动变压器的零点残余电压？用什么方法可以减小零点残余电压？

差动变压器的零点残余电压是指当差动变压器的动铁芯处于零位（即平衡位置）时，其输出端仍然存在的小幅度电压。这一电压本应为零，但由于制造、安装或电路上的非理想因素，会产生残余电压。

零点残余电压的成因：1.绕组不对称性，两个次级绕组可能在匝数、绕组间距或导线电阻上存在微小差异，导致感应电动势不完全相等，产生残余电压；2.铁芯材料的非理想性，铁芯的磁性能可能不是完全对称的，例如磁滞损耗或磁导率的不均匀性，导致零点位置的磁通量不完全平衡；3.安装或机械误差，动铁芯可能无法完全对准零位，存在机械偏移或倾斜，导致输出信号偏差；4.激励电源的非对称性，差动变压器需要交流电源激励，若激励电源的波形不对称或存在谐波分量，也会引入残余电压；5.干扰和噪声，外界电磁干扰或传感器电路内部的热噪声、漏磁等都会叠加到输出信号中，形成残余电压。

减小零点残余电压的方法：1.提高绕组对称性，在制造过程中严格控制次级绕组的匝数、分布和材料一致性，确保两个绕组感应电动势对称；2.优化铁芯设计，选用高质量的磁性材料，减少磁滞效应和磁导率的不均匀性。改善铁芯的加工工艺，确保几何对称性；3.机械校准，在安装时精确调整动铁芯的位置，确保其在零位时与铁芯和绕组的对称中心完全重合；4.电路补偿，通过电路设计引入零点补偿电路，例如使用差动放大器对残余电压进行校正。引入自动调零功能，实时调整输出信号以消除残余电压；5.使用滤波技术，在输出端加入低通滤波器，滤除激励信号中的谐波分量和高频噪声；6.改进激励电源，使用高质量的正弦波信号源，确保激励电源波形的对称性和稳定性；7.动态调整，在数字信号处理系统中，利用软件算法对残余信号进行动态校准。

总结，零点残余电压是差动变压器中的固有误差，可以通过提高制造工艺、优化设计、改善安装精度和使用电子补偿等多种方法减小。具体方法的选择需根据应用场景和精度要求综合考虑。

#### 4. 用差动变压器测量振动频率的上限受什么影响？

用差动变压器测量振动频率的上限主要受以下几个因素的影响：1.传感器的带宽，差动变压器的频率响应有限，超出其带宽范围后，输出信号会衰减或失真，从而影响测量精度。带宽通常受传感器内部绕组和铁芯的特性、激励频率的范围等因素影响；2.磁滞效应，在较高频率下，差动变压器的铁芯材料可能出现磁滞现象，导致磁场响应滞后，影响测量的准确性，尤其是在频率较高时，这种效应会更加明显；3.机械共振频率，差动变压器的结构本身可能具有固有的机械共振频率。当频率接近该共振频率时，传感器的灵敏度和稳定性会大幅下降，从而限制其测量的上限；4.信号噪声和干扰，高频信号更容易受到电磁干扰和噪声的影响。差动变压器的输出信号会受到外界噪声的叠加，高频振动信号可能被噪声掩盖，导致测量误差增大；5.电路带宽，差动变压器的输出信号需要通过信号处理电路（如放大器、滤波器等）。如果信号处理电路的带宽不足，可能导致高频部分的信号衰减或丢失，限制了测量的频率范围；6.激励信号的频率特性，差动变压器的激励信号通常是交流信号，如果激励信号的频率过高，可能无法有效地激发传感器，导致输出信号弱或不稳定，进而限制了测量频率的上限。

综上所述，差动变压器测量振动频率的上限受传感器带宽、铁芯材料特性、机械结构共振、信号噪声、电子电路性能等多个因素的影响。

## 实验十 电容式传感器位移实验

### 一. 实验目的

了解电容式传感器结构及其特点。

### 二. 基本原理

利用电容  $C = \epsilon A / d$  的关系式, 通过相应的结构和测量电路, 可以选择  $\epsilon$ 、 $A$ 、 $d$  三个参数中保持二个参数不变, 而只改变其中一个参数, 就可以组成测介质的性质 ( $\epsilon$  变)、测位移 ( $d$  变) 和测距离、液位 ( $A$  变) 等多种电容传感器。

本实验采用的传感器为圆筒式变面积差动结构的电容式位移传感器, 差动式一般优于单组 (单边) 式的传感器, 它灵敏度高、线性范围宽、稳定性高。如图 2-10 所示, 由二个圆筒和一个圆柱组成。

设圆筒的半径为  $R$ ; 圆柱的半径为  $r$ ; 圆柱的长为  $x$ , 则电容量为  $C = \epsilon^2 \pi x / \ln(R / r)$ 。

图中  $C_1$ 、 $C_2$  是差动连接, 当图中的圆柱产生  $\Delta X$  位移时, 电容量的变化量为  $\Delta C = C_1 - C_2 = \epsilon^2 \pi 2 \Delta X / \ln(R / r)$ , 式中  $\epsilon^2 \pi$ 、 $\ln(R / r)$  为常数, 说明  $\Delta C$  与位移  $\Delta X$  成正比, 配上配套测量电路就能测量位移。

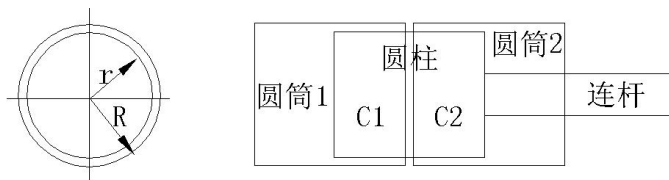


图 2-10 电容式位移传感器结构

1、测量电路 (电容变换器): 测量电路画在实验模板的面板上。其电路的核心部分是图 16—2 的二极管环路充放电电路。

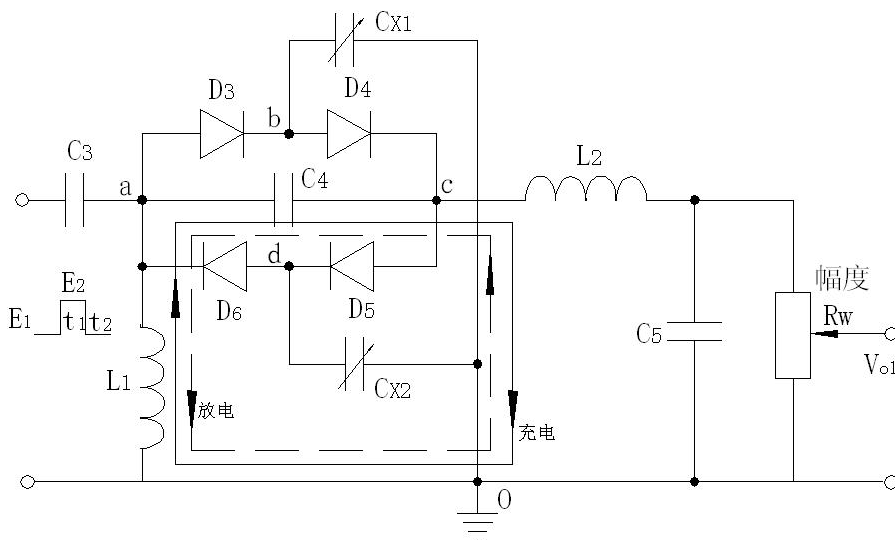


图 16—2 二极管环形充放电电路

在图 16—2 中，环形充放电电路由 D3、D4、D5、D6 二极管、C4 电容、L1 电感和 C<sub>X1</sub>、C<sub>X2</sub>（实验差动电容位移传感器）组成。

当高频激励电压（ $f > 100\text{kHz}$ ）输入到 a 点，由低电平 E1 跃到高电平 E2 时，电容 C<sub>X1</sub> 和 C<sub>X2</sub> 两端电压均由 E1 充到 E2。充电电荷一路由 a 点经 D3 到 b 点，再对 C<sub>X1</sub> 充电到 0 点（地）；另一路由 a 点经 C4 到 c 点，再经 D5 到 d 点对 C<sub>X2</sub> 充电到 0 点。此时，D4 和 D6 由于反偏置而截止。在 t<sub>1</sub> 充电时间内，由 a 到 c 点的电荷量为：

$$Q_1 = C_{X2} (E_2 - E_1) \quad (16-1)$$

当高频激励电压由高电平 E2 返回到低电平 E1 时，电容 C<sub>X1</sub> 和 C<sub>X2</sub> 均放电。C<sub>X1</sub> 经 b 点、D4、c 点、C4、a 点、L1 放电到 0 点；C<sub>X2</sub> 经 d 点、D6、L1 放电到 0 点。在 t<sub>2</sub> 放电时间内由 c 点到 a 点的电荷量为：

$$Q_2 = C_{X1} (E_2 - E_1) \quad (16-2)$$

当然，（16—1）式和（16—2）式是在 C4 电容值远远大于传感器的 C<sub>X1</sub> 和 C<sub>X2</sub> 电容值的前提下得到的结果。电容 C4 的充放电回路由图 16—2 中实线、虚线箭头所示。

在一个充放电周期内（ $T = t_1 + t_2$ ），由 c 点到 a 点的电荷量为：

$$Q = Q_2 - Q_1 = (C_{X1} - C_{X2}) (E_2 - E_1) = \Delta C_X \Delta E \quad (16-3)$$

式中：C<sub>X1</sub> 与 C<sub>X2</sub> 的变化趋势是相反的（传感器的结构决定的，是差动式）。

设激励电压频率  $f = 1/T$ ，则流过 ac 支路输出的平均电流 i 为：

$$i = fQ = f\Delta C_X \Delta E \quad (16-4)$$

式中：ΔE—激励电压幅值；ΔC<sub>X</sub>—传感器的电容变化量。

由（16—4）式可看出：f、ΔE 一定时，输出平均电流 i 与 ΔC<sub>X</sub> 成正比，此输出平均电流 i 经电路中的电感 L2、电容 C5 滤波变为直流 I 输出，再经 R<sub>w</sub> 转换成电压输出  $V_{o1} = I R_w$ 。由传感器原理已知 ΔC 与 ΔX 位移成正比，所以通过测量电路的输出电压 V<sub>o1</sub> 就可知 ΔX 位移。

### 三、实验器材

主机箱、电容传感器、电容传感器实验模板、测微头。

#### 四、实验步骤

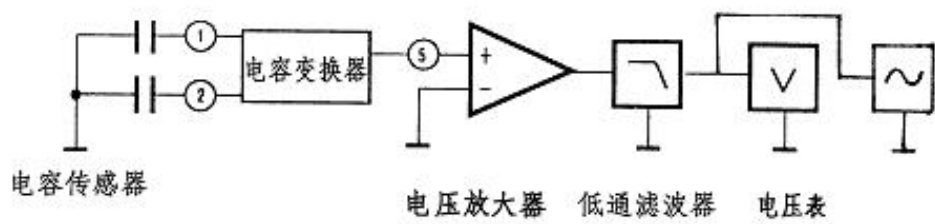


图 3-7 电容传感器位移实验原理图

- 1、按图 3-8 将电容传感器装于电容传感器实验模板上，实验模板的输出 V o1 接主机箱电压表的 V in。
- 2、将实验模板上的 R w 调节到中间位置（方法：逆时针转到底再顺时针传 3 圈）。
- 3、将主机箱上的电压表量程（显示选择）开关打到 2 v 档，合上主机箱电源开关；  
旋转测微头改变电容传感器的动极板位置使电压表显示 0 v ，再转动测微头（向同一个方向）5 圈，记录此时测微头读数和电压表显示值，此点为实验起点值；  
此后，反方向每转动测微头 1 圈即  $\Delta X = 0.5 \text{ mm}$  位移读取电压表读数，共转 10 圈读取相应的电压表读数（单行程位移方向做实验可以消除测微头的回差）；  
将数据填入表 3-7 并作出 X—V 实验曲线。

部分实验过程图片：

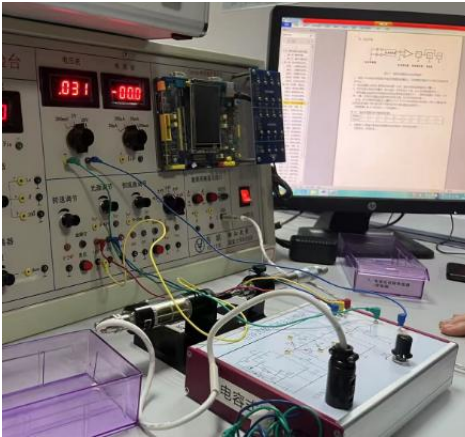
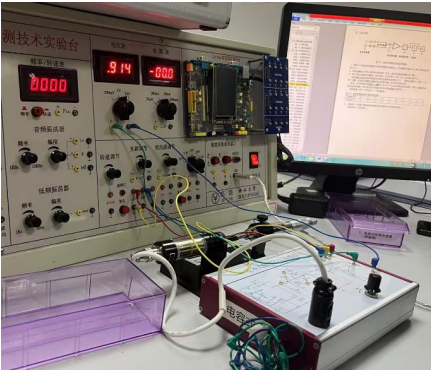


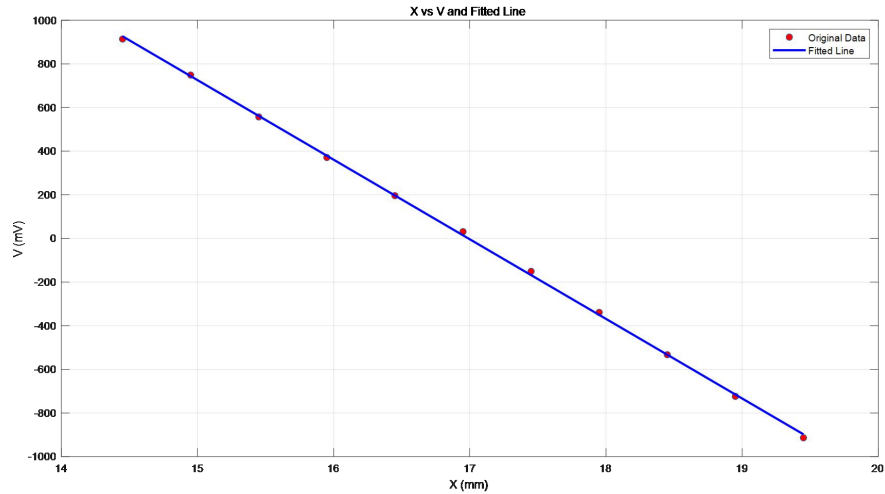
表 3-7 电容传感器位移与输出电压值

X(mm)	14.4500	14.9500	15.4500	15.9500	16.4500	16.9500	17.4500	17.9500	18.4500	18.9500	19.4500
V(mv)	914	749	557	371	196	31	-151	-339	-533	-724	-914

4、 根据表 3-7 数据计算电容传感器的系统灵敏度  $S$  和非线性误差  $\delta$ 。

实验完毕，关闭电源。

计算电容传感器的系统灵敏度  $S$  和非线性误差  $\delta$ ：



拟合直线的灵敏度  $S$ ：-364.8909  
非线性误差  $\delta$ ：  
-12.5000    4.9455    -4.6091    -8.1636    -0.7182    16.7273    17.1727    11.6182    0.0636    -8.4909    -16.0455

$f_x >>$

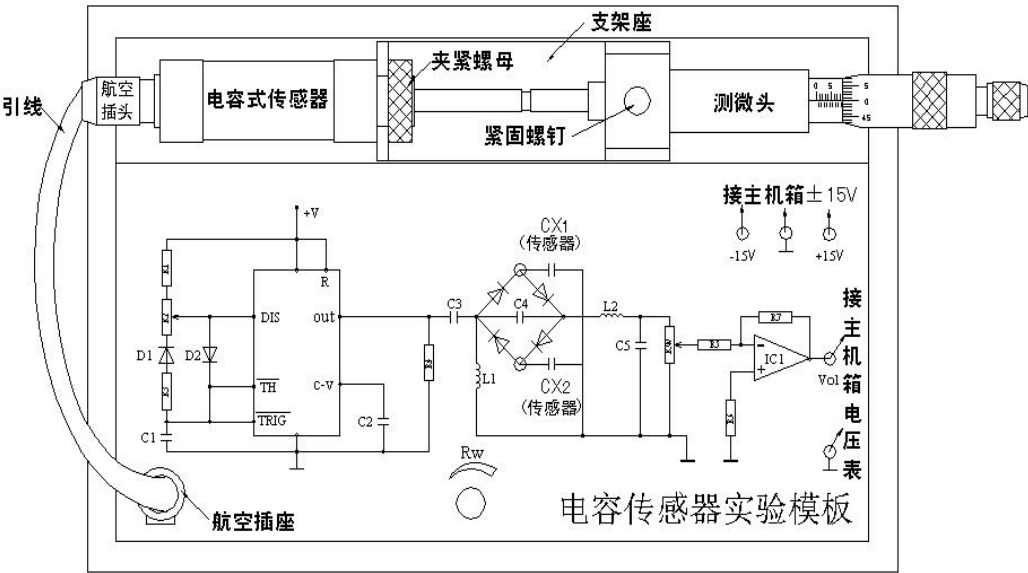


图 3-8 电容传感器位移实验安装、接线图



## 五、思考题

试设计利用  $\epsilon$  的变化测谷物湿度的传感器原理及结构？能否叙述一下在设计中应考虑哪些因素？

### 1. 设计原理：基于介电常数 $\epsilon$ 测量谷物湿度的传感器原理

谷物湿度传感器的设计原理基于物质的介电常数 ( $\epsilon$ ) 随着水分含量的变化而变化。水分对电磁波的介电性质具有显著的影响，湿度较高时，水分子在电场中能够极大地改变材料的介电常数。因此，通过测量谷物样品的介电常数，可以推算出其含水量。

### 2. 传感器工作原理

为了利用介电常数的变化测量湿度，传感器通常采用电容法。通过两个电极构成一个电容器，谷物样品充填在电极之间。由于水分含量变化会改变样品的介电常数，从而影响电容值。通过测量电容值的变化，可以间接得出湿度。

### 3. 传感器结构设计

结构组成：

电极部分：采用导电材料（如铜、铝等）作为电极，电极的形状和尺寸需要根据谷物的类型和传感器的应用来选择。

电容器部分：电极之间需要形成一定的电容结构，可以采用单端或双端结构，电极间的距离和面积对测量的灵敏度和准确性至关重要。

传感器外壳：外壳需要具有良好的机械强度和防护性，以避免外界环境对传感器性能的影响。外壳材料一般采用非导电、耐腐蚀的材料，如塑料或不锈钢。

信号处理电路：电容变化需要通过信号处理电路转换为可以读取的输出信号。常用的方法包括将电容信号转换为频率信号或电压信号。

### 4. 设计中需要考虑的因素

在设计基于介电常数变化测量湿度的传感器时，以下因素需要特别注意：

#### 1. 传感器的灵敏度：

需要设计电极的形状和面积，以确保电容的变化能够准确地反映湿度的变化。过小的面积可能导致灵敏度不足，过大的面积则可能增加传感器的复杂度。

#### 2. 工作频率：

传感器的工作频率对于介电常数的变化非常敏感。频率过低可能无法充分响应水分变化，频率过高可能导致传感器受到其他环境因素（如温度、湿度、空气介电常数等）的影响。

#### 3. 电极间距：

电极间距直接影响电容的计算。较小的间距可以增加灵敏度，但也可能导致其他问题（如短路或损耗增加）。因此，间距需要在灵敏度和稳定性之间找到平衡。

#### 4. 环境因素：

温度、压力、盐分等环境因素会影响介电常数的变化，因此在设计时，需要采取一定的补偿措施，确保传感器能在不同的环境条件下稳定工作。

#### 5. 材料选择：

传感器的材料应具有良好的导电性、抗腐蚀性和稳定性。此外，材料的介电常数需要尽可能稳定，以避免对湿度测量的干扰。

#### 6. 测量范围与精度：

设计时需要确定测量的湿度范围。一般来说，谷物的湿度范围在 10%到 30%之间，传感

器的设计要覆盖这个范围，并确保高精度的测量。

7. 信号处理和数据传输：

传感器产生的电容信号需要通过适当的信号处理电路转化为可测量的输出信号。此外，输出信号需要与仪表或计算机系统兼容，以实现数据传输和处理。

8. 稳定性和可靠性：

传感器需要在长时间使用中保持稳定的性能，尤其是在恶劣的环境中，如高温、高湿等条件下。设计中需要考虑电极材料的耐用性和整体封装的防护性。

总结：

基于介电常数的变化来测量谷物湿度的传感器设计需要综合考虑电极设计、信号处理、工作频率、环境补偿等多方面因素。只有合理优化这些设计因素，才能制造出既灵敏又稳定的湿度传感器。

## 实验十一 压电式传感器振动测量实验

### 一、实验目的

了解压电传感器的测量振动的原理和方法。

### 二、基本原理

压电式传感器由惯性质量块和受压的压电片等组成（观察实验用压电加速度计结构）。工作时传感器感受与试件相同频率的振动，质量块便有正比于加速度的交变力作用在晶片上，由于压电效应，压电晶片上产生正比于运动加速度的表面电荷。

### 三、实验器材

主机箱、差动变压器实验模板、振动源、示波器。

### 四、实验步骤

1、按图 4-3 所示将压电传感器安装在振动台面上（与振动台面中心的磁钢吸合），振动源的低频输入接主机箱中的低频振荡器，其它连线按图示意接线。

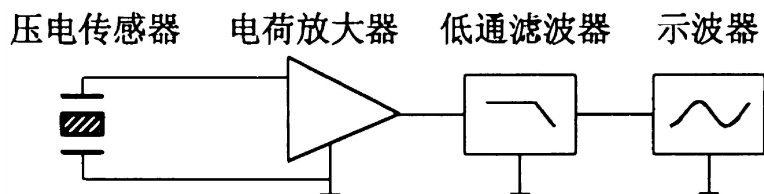


图 4-2 压电传感器振动实验原理图

2、合上主机箱电源开关，调节低频振荡器的频率和幅度旋钮使振动台振动，观察低通滤波器输出的波形。

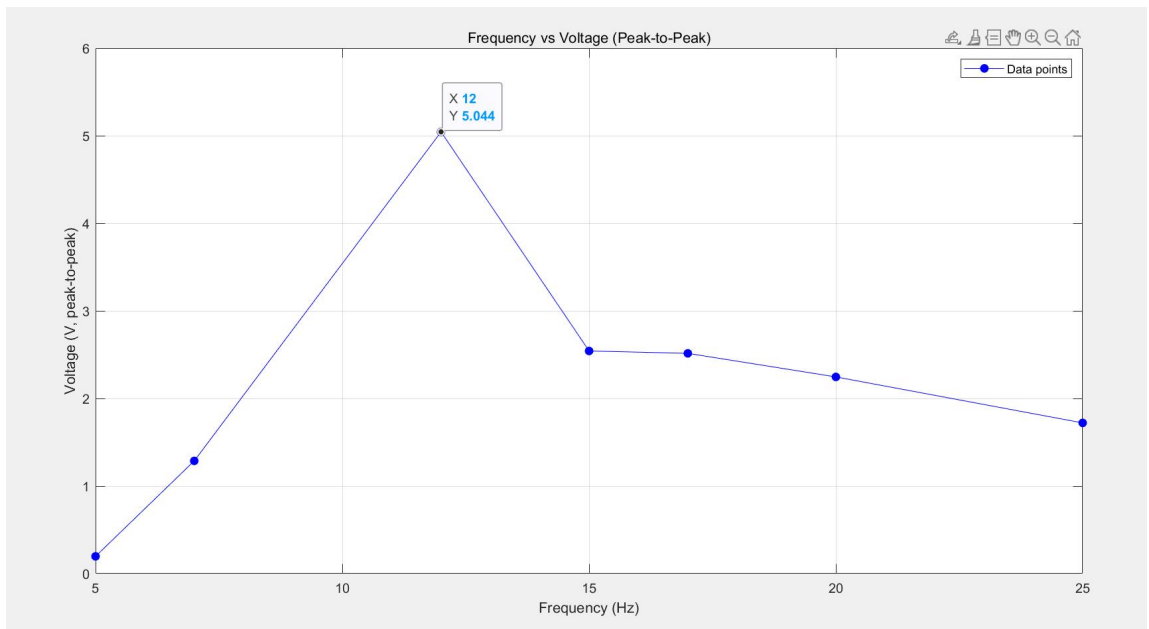
3、用示波器的两个通道同时观察低通滤波器输入端和输出端波形；在振动台正常振动时用手指敲击振动台同时观察输出波形变化。

4、改变振动源的振荡频率（调节主机箱低频振荡器的频率），观察输出波形变化。

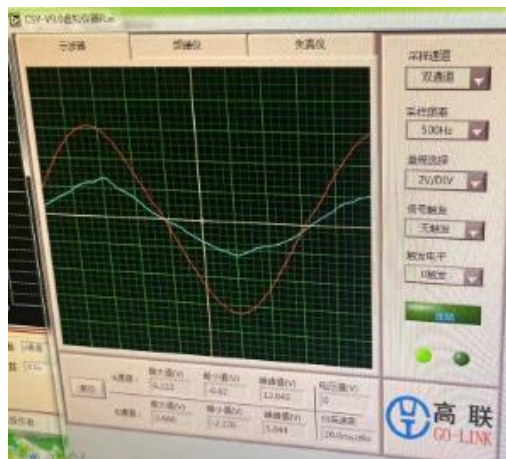
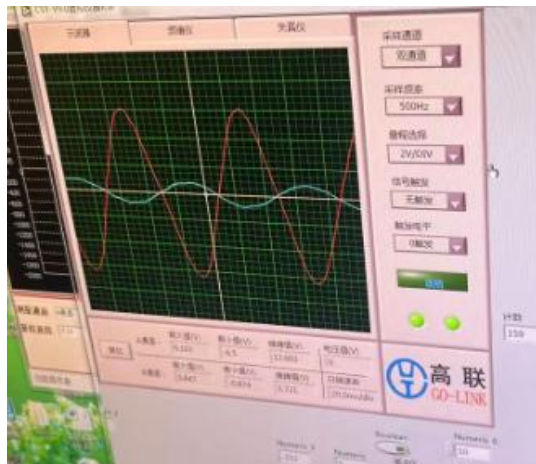
低频振荡器的幅度旋钮固定至最大，调节频率，调节时用频率表监测频率，用示波器读出峰峰值填入表 4-2。实验完毕，关闭电源。

表 4-2

f (Hz)	5	7	12	15	17	20	25
V (p-p)	0.197	1.287	5.044	2.542	2.515	2.246	1.721



部分实验过程图片：



五、思考题

根据实验结果，可以知道振动台的自振频率大致多少？传感器输出波形的相位差  $\Delta \phi$  大致为多少？

观察可得当频率 12Hz 时振幅最大，示波器的峰峰值最大，为 5.044V，自振频率大约是 12Hz。在自振频率附近的相位差  $\Delta \phi$  接近  $0^\circ$ ，而随着频率的上升，相位差  $\Delta \phi$  会增大至接近  $180^\circ$ 。

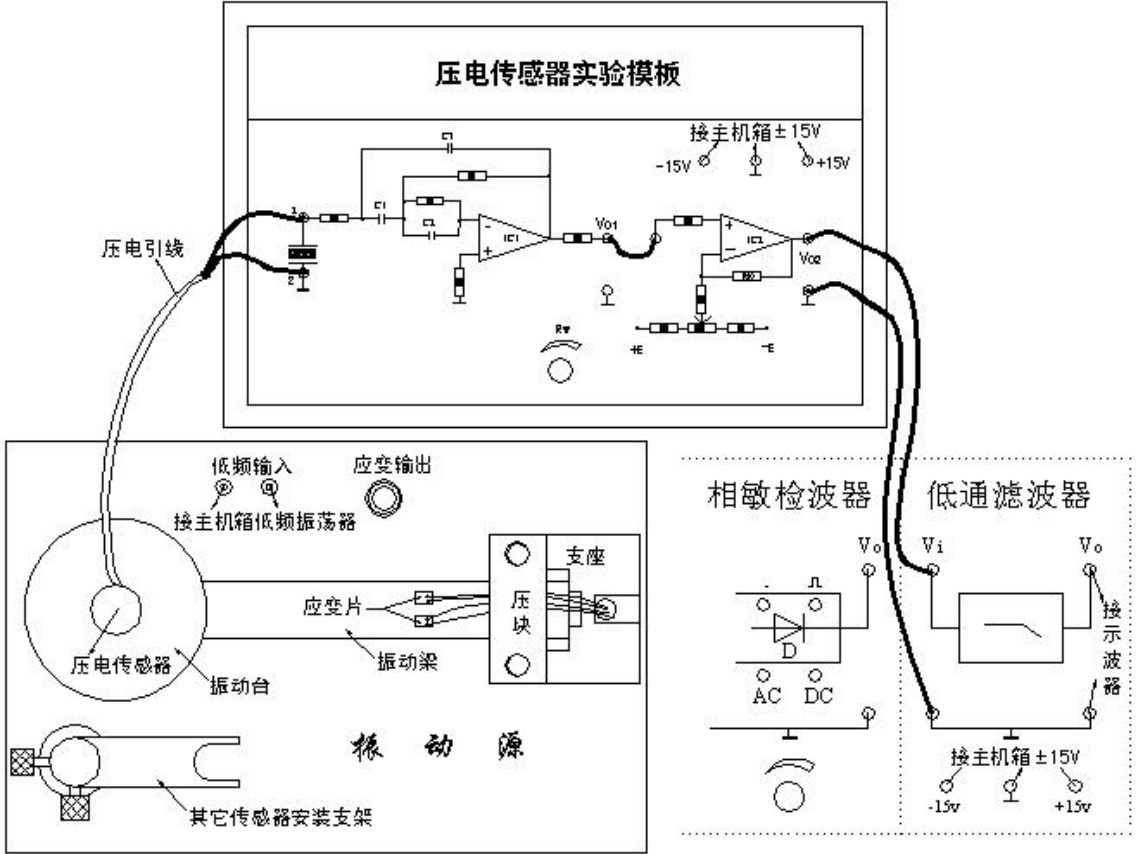


图 4-3 压电传感器振动实验安装、接线示意图

## 实验十二 电涡流传感器位移实验

### 一、实验目的

了解电涡流传感器测量位移的工作原理和特性。

### 二、基本原理

通过交变电流的线圈产生交变磁场，当金属体处在交变磁场时，根据电磁感应原理，金属体内产生电流，该电流在金属体内自行闭合，并呈旋涡状，故称为涡流。

涡流的大小与金属导体的电阻率、导磁率、厚度、线圈激磁电流频率及线圈与金属体表面的距离  $x$  等参数有关。

电涡流的产生必然要消耗一部分磁场能量，从而改变激磁线圈阻抗，涡流传感器就是基于这种涡流效应制成的。电涡流工作在非接触状态（线圈与金属体表面不接触），当线圈与金属体表面的距离  $x$  以外的所有参数一定时可以进行位移测量。

### 三、实验器材

主机箱、电涡流传感器实验模板、电涡流传感器、测微头、被测体（铁圆片）。

### 四、实验步骤

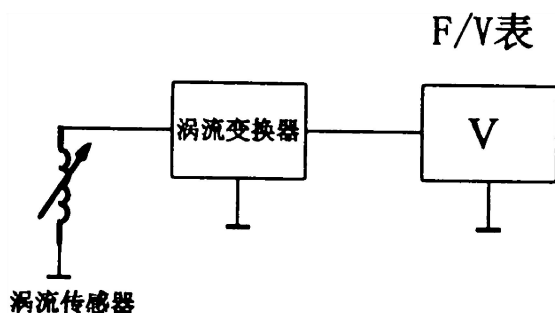


图 4-4 电涡流传感器原理图

- 1、观察传感器结构，这是一个平绕线圈。根据图 4-5 安装测微头、被测体、电涡流传感器并接线。
- 2、调节测微头使被测体与传感器端部接触，将电压表显示选择开关切换到 20V 档，检查接线无误后开启主机箱电源开关，记下电压表读数，然后每隔 0.1mm 读一个数，直到输出几乎不变为止。将数据列入表 4-2。

部分实验过程图片：

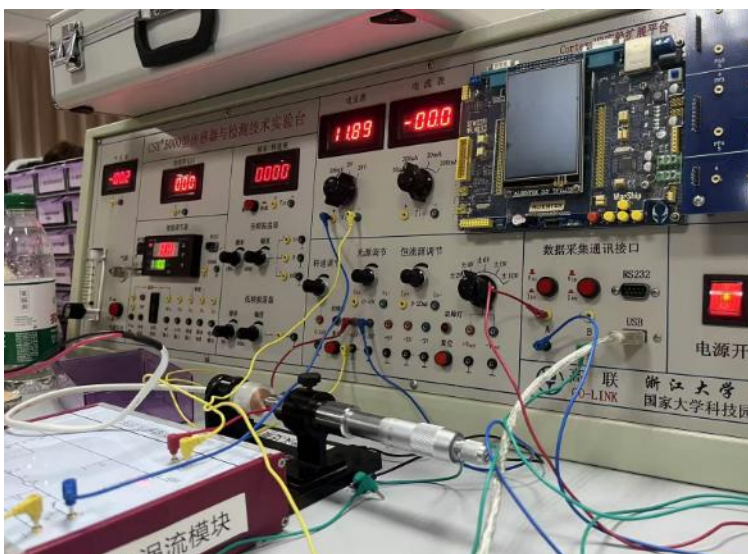
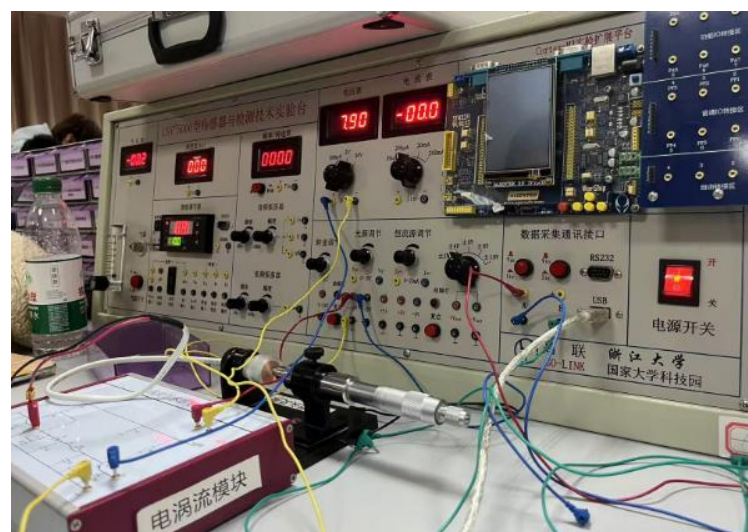
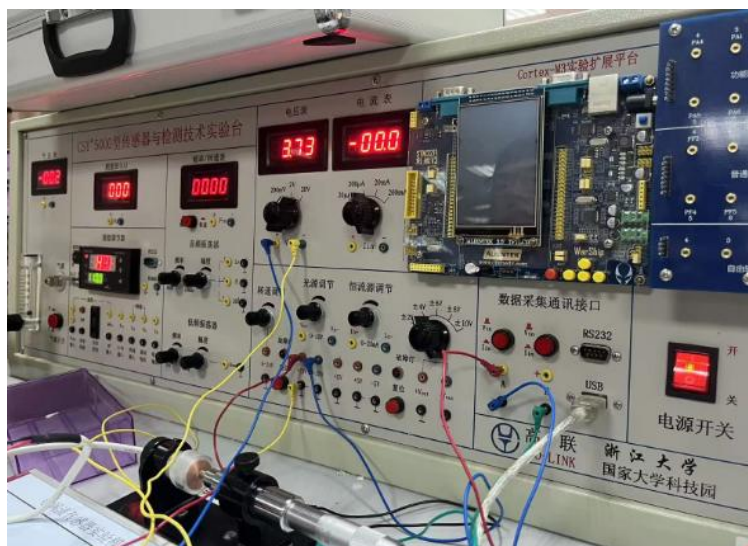
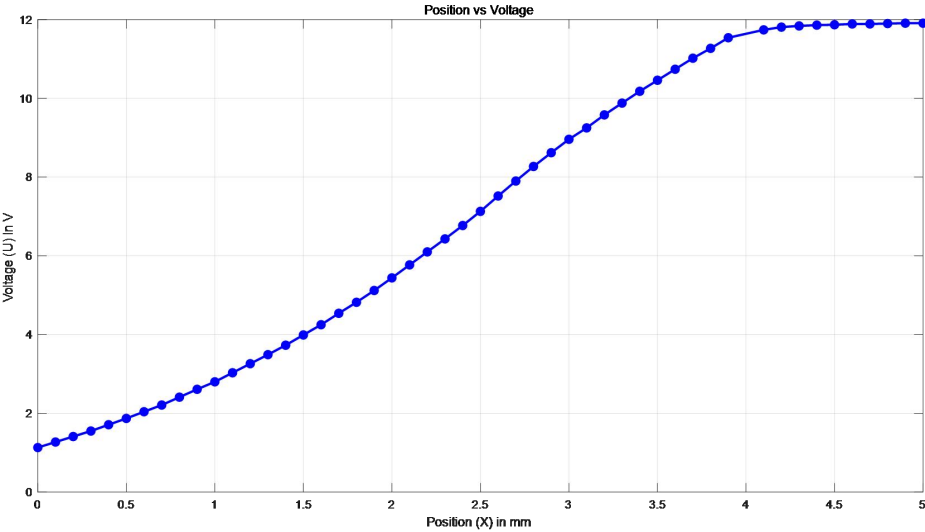


表 4-2 电涡流传感器位移 X 与输出电压数据

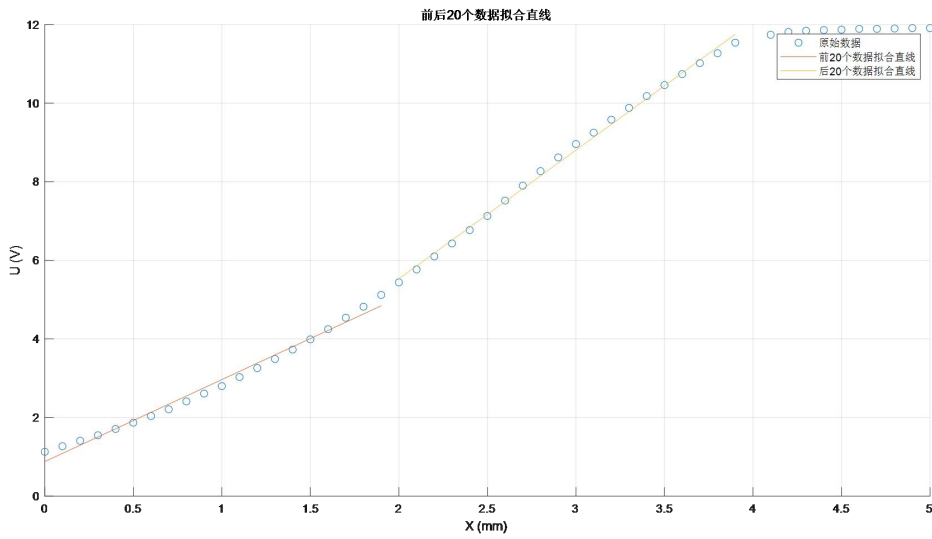
X (mm)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
U (V)	1.13	1.27	1.41	1.55	1.71	1.87	2.04	2.21	2.41	2.61
X (mm)	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
U (V)	2.80	3.03	3.26	3.49	3.73	3.99	4.25	4.54	4.82	5.12
X (mm)	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
U (V)	5.44	5.77	6.10	6.43	6.77	7.13	7.52	7.90	8.27	8.62
X (mm)	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9
U (V)	8.96	9.25	9.58	9.88	10.18	10.46	10.74	11.02	11.27	11.54
X (mm)	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
U (V)	11.74	11.81	11.84	11.86	11.87	11.89	11.89	11.90	11.91	11.91

3、画出 V—X 曲线，根据曲线找出线性区域及进行正、负位移测量时的最佳工作点（即曲线线性段的中点）。试计算测量范围为 1mm 与 3 mm 时的灵敏度和线性度（可以用端基法或其它拟合直线）。实验完毕，关闭电源。





以 1mm（红色线）或 3 mm（黄色线）为最佳工作点的两个线性区：



1mm:

$$Y1=2.08631578947368X+0.879999999999999$$

即灵敏度  $S=2.08631578947368$

1mm 处的非线性误差为  $\left( \left( 2.08631578947368 \times 1 + 0.879999999999999 \right) - 2.80 \right) / \left( 2.08631578947368 \times 1 + 0.879999999999999 \right) \times 100\% = 5.6\%$

3mm:

$$Y3=3.27421052631579X-1.01742105263158$$

即灵敏度  $S=3.27421052631579$

1mm 处的非线性误差为  $\left( - \left( 3.27421052631579 \times 3 - 1.01742105263158 \right) + 8.96 \right) / \left( 3.27421052631579 \times 3 - 1.01742105263158 \right) \times 100\% = 1.758\%$

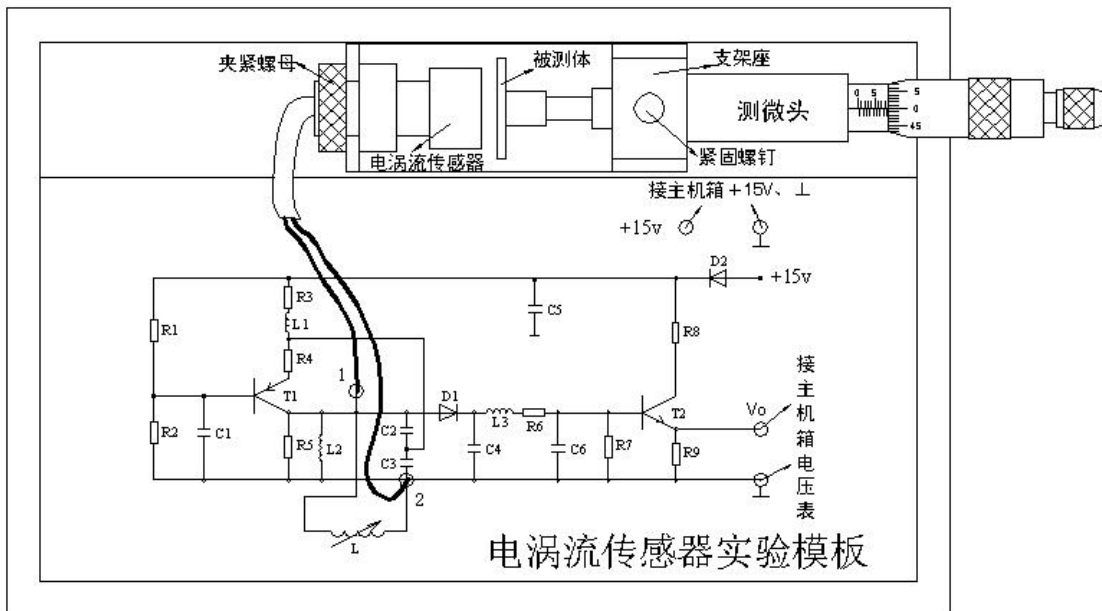


图 4-4 电涡流传感器安装、按线示意图

## 五、思考题

1、电涡流传感器的量程与哪些因素有关，如果需要测量 $\pm 5\text{mm}$  的量程应如何设计传感器？

电涡流传感器的量程与以下几个因素有关：1.探头与被测物体之间的距离（探头与物体的间隙），电涡流传感器的工作原理基于探头与被测物体之间的电涡流感应效应。间隙过小或过大都会影响传感器的灵敏度和准确性。传感器的量程通常取决于这个间隙的变化范围。量程一般是指探头可以在有效距离范围内准确测量的位移距离；2.传感器的灵敏度，灵敏度指传感器输出信号相对于位移的变化量。高灵敏度传感器可以在较小的位移下产生更大的输出信号，从而扩展测量范围。灵敏度与传感器的设计结构、线圈的尺寸、驱动频率等因素有关；3.电感量与物体的导电性，被测物体的导电性、磁导率和尺寸会影响电涡流传感器的测量范围。导电性较强的材料通常会增强涡流的感应效应，从而提高传感器的灵敏度；4.传感器的工作频率，电涡流传感器的工作频率通常会影响其量程。在高频工作时，传感器对位移变化的响应更为灵敏，但也可能使量程缩小。

设计方案（测量 $\pm 5\text{mm}$  的量程）：1.选择适当的探头尺寸和工作频率，对于 $\pm 5\text{mm}$  的量程，选择适合的探头和频率，以确保在此范围内传感器能够保持较高的灵敏度。一般情况下，可以选择频率较低的电涡流传感器，以增加量程，特别是在测量较大位移时；2.设置适当的间隙，确保传感器的探头与被测物体之间的间隙能够覆盖 $\pm 5\text{mm}$  的位移范围，同时保证在最大位移时依然能够获得准确的测量结果；3.优化线圈设计，设计高灵敏度的线圈，以提高传感器对位移变化的响应能力，从而保证在 $\pm 5\text{mm}$  范围内精确测量；4.选择适合的信号处理电路，使用高精度的信号放大和滤波电路来确保传感器的输出信号能够准确反映位移变化，尤其是在较大位移时。

2、用电涡流传感器进行非接触位移测量时，如何根据量程使用选用传感器？

1.明确测量的位移范围（量程），确保传感器的量程覆盖此范围。

- 2.选择合适的灵敏度，对于小位移范围需要更高灵敏度的传感器。
- 3.考虑探头与物体的间隙，使传感器在量程内稳定工作。
- 4.选择合适的工作频率，高频传感器适合精确测量小位移，低频适合大位移。
- 5.确保传感器适应环境条件，如温度、湿度等。
- 6.考虑材料特性，如被测物体的导电性和磁性。
- 7.确认非线性误差并进行校正，特别是在量程的极限部分。