

前 言

CSY 传感器系统实验仪是本公司开发研制生产的，已有 20 年历史。1984 年国内 17 所高等院校及机构的专家代表成立鉴定委员会专门针对 CSY-1 型传感器系统实验仪进行了鉴定，鉴定后专家代表们一致认为：

一、该实验仪集多种传感器、检测电路、信号源于一体，构思新颖，设计合理，功能较全。像这样水平的传感器实验仪在国内还是首次出现，具有国内先进水平，并达到英国 JJSL1 型系统实验仪相同水平，功能上还有所扩展。

二、该实验仪突出了教学仪器特点，透明壳体的传感器、插入式单元电路，利于直观教学，便于维修使用，有益于学生独立进行实验，适合于培养开发型人才的需要。

三、该实验仪可配合“传感器原理”、“非电量电测技术”、“自动检测技术”和“机械工程测试技术基础”等课程教学，它的推广使用必将进一步提高上述课程的教学实验水平，并解决了传感器实验设备费用昂贵的问题。

CSY-1 型传感器系统实验仪是中国首台传感器实验仪，填补了中国传感器课程实验教学仪的空白。

CSY-9XX 型传感器系统实验仪是 CSY-1 型传感器系统实验仪的改进型。该仪器获省优秀科技成果奖；1991 年全国火炬高新技术优秀奖，1994 年浙江大学科技成果二等奖。

CSY-9XX 传感器系统实验仪主要用于各大、中专、院校及职业、师范院校开设的“自动检测技术”、“传感器原理与技术”、“自动化控制”、“非电量电测技术”等课程的实验教学。

本用户手册是在原实验指南的基础上广泛征求了全国许多师生的意见后编写的。在编写上我们力求有较大的适应面便于学生独立操作，加强动手能力培养。希望学生通过实验有助于深入理解课本知识。由于编写者时间、水平所限，难免有疏漏谬误之处，热切期望用户的赐教！

希望实验仪使用者认真阅读本用户手册，谨慎操作，否则容易引起器件损坏。如果您在使用 CSY 实验仪中发现问题，请打我们的服务热线：0571-85222858 谢谢您的合作！

目 录

CSY-9XX 传感器系统实验仪说明书:

一、实验仪组成	4
二、主要技术参数、性能及说明	5
三、V9.0 数据采集卡及处理软件简介	8

CSY-9XX 传感器系统实验仪使用（示范实验举例）

实验一	应变片单臂特性实验	10
实验二	应变片半桥特性实验	18
实验三	应变片全桥特性实验	19
*实验四	应变片单臂、半桥、全桥特性比较实验	20
实验五	应变片的温度影响实验	21
*实验六	应变片温度补偿实验	22
实验五	应变直流全桥的应用—电子秤实验	23
实验八	移相器、相敏检波器实验	25
实验九	应变片交流全桥的应用(应变仪)—振动测量实验	29
实验十	压阻式压力传感器的压力测量实验	31
实验十一	电容式传感器的位移实验	33
实验十二	差动变压器的性能实验	36
实验十三	激励频率对差动变压器特性的影响实验	40
实验十四	差动变压器零点残余电压补偿实验	41
实验十五	差动变压器测位移实验	42
实验十六	差动变压器振动测量实验	44
实验十七	电涡流传感器位移特性实验	45
实验十八	被测体材质对电涡流传感器特性影响实验	49
实验十九	电涡流传感器测振动实验	50
实验二十	压电式传感器测振动实验	51
实验二十一	热电偶的原理及现象实验	55
实验二十二	NTC 热敏电阻温度特性实验	58
实验二十三	PN 结温度传感器温度特性实验	60

实验二十四	线性霍尔式传感器位移特性实验	63
实验二十五	磁电式传感器特性实验	66
实验二十六	光电传感器测转速实验	67
实验二十七	光纤位移传感器测位移特性实验	69
实验二十八	气敏传感器实验	72
实验二十九	湿敏传感器实验	73
实验三十	数据采集系统实验—静态采集举例	75
实验三十一	数据采集系统实验—动态采集举例	77

注：根据实验仪的型号做相应的实验，目录中打*的实验由用户自己组织做，用户可以灵活应用开发其他实验项目。

CSY-9XX 型传感器实验仪说明书

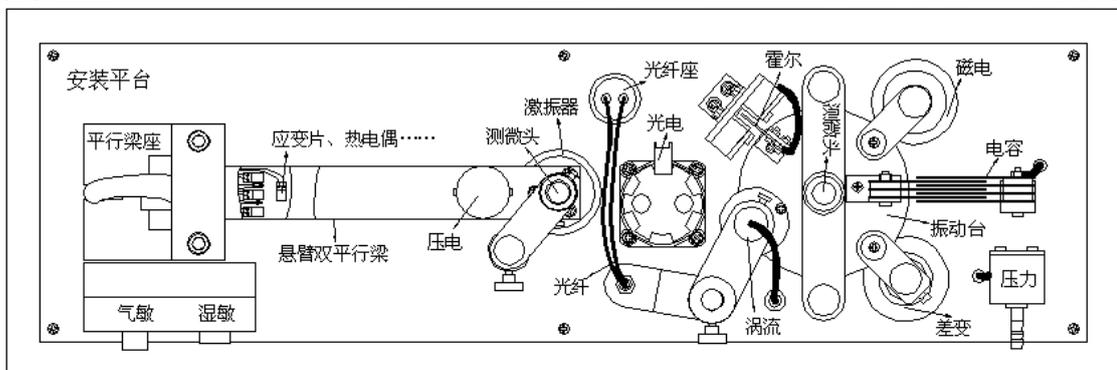
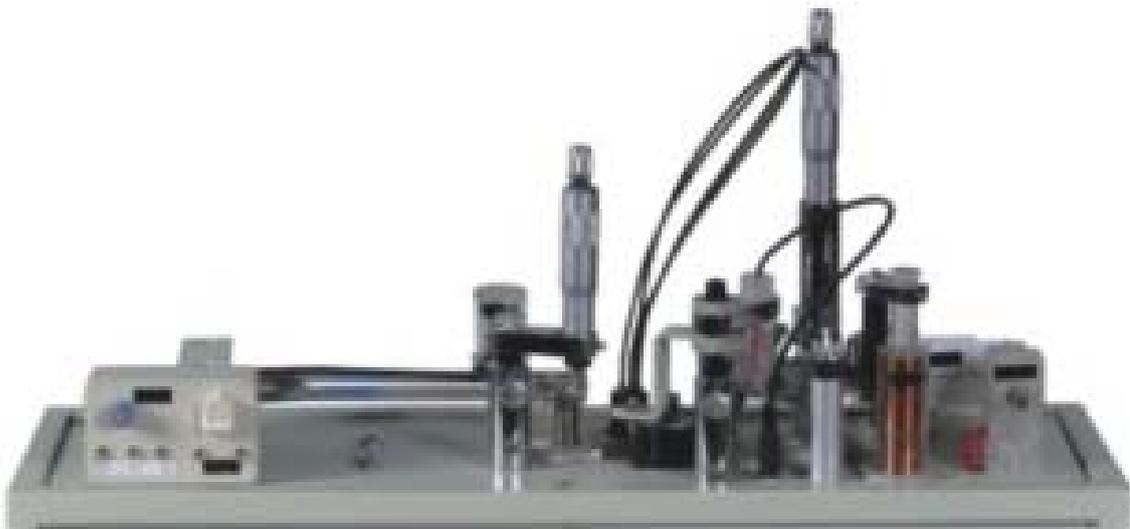
一、实验仪组成

CSY9XX 传感器实验仪：主要由机壳、机头（传感器安装台）、显示面板、调理电路面板（传感器输出单元、传感器转换放大处理电路单元）等组成。

1、机壳：

机壳内部装有直流稳压电源、振荡信号板等。

2、机头（传感器安装平台）：



机头图

由悬臂双平行梁和振动台组成。

(1)、双平行梁（应变梁）：

在双平行梁的上、下梁片表面粘贴了应变片；封装了 PN 结、NTC RT 热敏电阻、热电偶、加热器；在梁的自由端安装了压电传感器、激振器（磁钢、激振线圈）和测微头。

测微头：调节测微头产生力或位移，做静态实验。

激振器：激励双平行梁振动，做动态实验。

(2)、振动台：

在振动台周围安装了光电转速传感器、电涡流传感器、光纤传感器、差动变压器、压阻式压力传感器、电容式传感器、磁电式传感器、霍尔式传感器；在振动台的下方安装了激振器（磁钢、激振线圈）；在振动台的上方安装了测微头。

测微头：调节测微头产生力或位移，做静态实验。

激振器：激励振动台梁振动，做动态实验。

3、显示面板：

由主电源单元、电机控制单元、直流稳压电源单元、F/V表（电压表）单元、PC口单元、电流表（频率/转速表）单元、音频振荡器单元、低频振荡器单元、±15V电源单元等组成。

4、调理电路面板：

由传感器输出单元、副电源、电桥、差动放大器、电容变换器、电压放大器、移相器、相敏检波器、电荷放大器、低通滤波器、涡流变换器等组成。

5、数据采集卡及处理软件：详见三、V9.0数据采集卡及处理软件。

***备注：实验仪的具体配置根据型号不同有差异，以具体型号的实物为准。**

二、主要技术参数、性能及说明

（一）、传感器（机头）部分：

- 1、电阻应变片：电阻值 350 Ω 左右；应变系数为 2。
- 2、热电偶：直流电阻 10 Ω 左右（由两个串接而成）；分度号为 T；冷端为环境温度。
- 3、热敏电阻：NTC 半导体热敏电阻；25℃ 时为 10K Ω 左右。
- 4、PN 结温度传感器：利用 1N4148 良好的温度线性电压特性；灵敏度为 -2.1mV/℃。
- 5、压电加速度传感器：由压电陶瓷片和铜质量块构成；电荷灵敏度为 20pC/g。
- 6、光电转速传感器：透射式光电耦合器（光电断续器）；TTL 电平输出。
- 8、电涡流传感器：直流电阻 1 Ω ~ 2 Ω；位移量程 ≥ 1mm。
- 9、光纤传感器：由半圆双 D 分布的多模光纤和光电变换座构成；位移量程 ≥ 1mm。
- 10、差动变压器：一个初级线圈、二个次级线圈（自感式）和铁芯构成；三个线圈直流电阻分别为 5 Ω ~ 10 Ω；音频 3KHz ~ 5KHz、电压峰峰值为 $V_{p-p}=2V$ 激励；位移量程 ≥ ±4mm。
- 11、压阻式压力传感器： $V_s^+ - V_s^-$ 端直流电阻为 4.7K Ω 左右、 $V_o^+ - V_o^-$ 端直流电阻为 7K Ω 左右；4V 直流电源供电；量程为 20kPa。
- 12、电容式传感器：由两组定片和一组动片构成差动变面积电容；量程 ≥ ±2mm。

13、磁电式传感器：由线圈和动铁构成；直流电阻 $30\ \Omega \sim 40\ \Omega$ ；灵敏度为 $500\text{mV}/(\text{m/s})$ 。

14、霍尔式传感器：霍尔片置于环形磁钢产生的梯度磁场中构成位移传感器；传感器激励端口直流电阻 $800\ \Omega \sim 1.5\text{K}\ \Omega$ ，输出端口直流电阻 $400\ \Omega \sim 600\ \Omega$ ；位移量程 $\geq 1\text{mm}$ 。

15、气敏传感器：酒精敏感型，TP-3 集体半导体气敏传感器；测量范围 $50 \sim 500\text{ppm}$ 。

16、湿敏传感器：电阻型，阻值变化几 $\text{M}\ \Omega \sim$ 几 $\text{K}\ \Omega$ ；测量范围 $30\% \text{RH} \sim 90\% \text{RH}$ 。

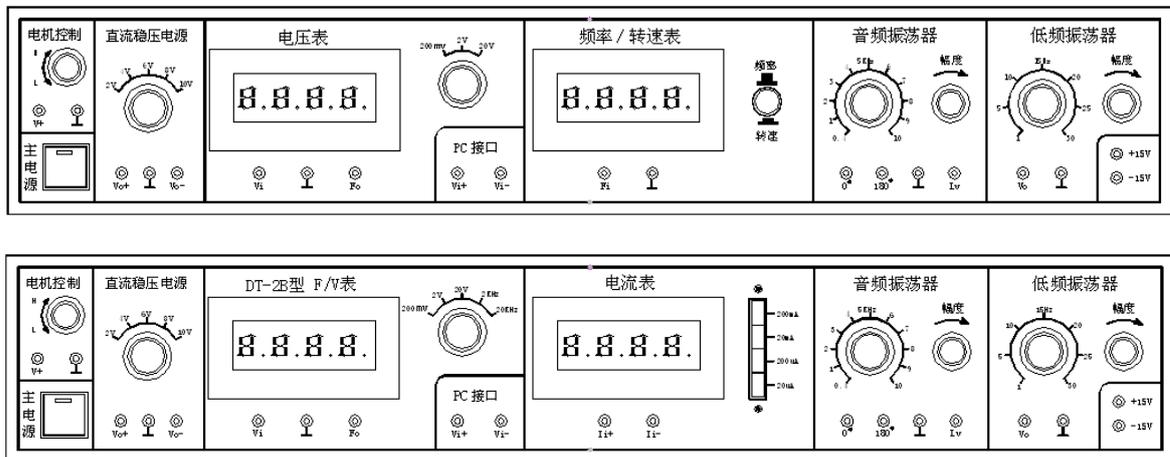
17、激振线圈：振动激振器，直流电阻 $30\ \Omega \sim 40\ \Omega$ 。

18、光电变换座：由红外发射、接收管构成，是光纤传感器的组件之一。

19、其它：25mm 测微头、加热器；光源、光敏电阻、光敏二、三极管；硅光电池、光电开关。

***备注：传感器配置根据型号不同有差异，以具体型号的实物为准。**

(二)、显示面板部分：



显示面板图

1、线性直流稳压电源：

(1)、 $\pm 2\text{V} \sim \pm 10\text{V}$ 分五档步进调节输出，最大输出电流 1A，纹波 $\leq 5\text{mV}$ 。

(2)、 $\pm 15\text{V}$ 定电压输出，最大输出电流 1A，纹波 $\leq 10\text{mV}$ 。

2、显示表：

(1)、三位半数字直流电压表：三档量程 (200mV 、 2V 、 20V) 切换，

精度 $\pm [(0.2\%) + 2 \text{ 个字}]$ 。

(1)、三位半数字直流 F/V (频率/电压) 表：五档 (200mV 、 2V 、 20V 、 2KHz 、 20KHz) 切换，

精度 $\pm [(0.2\%) + 2 \text{ 个字}]$ 。

(2)、四位频率 / 转速数字表：频率—转速切换，频率量程 9999Hz ，转速量程 5000n/min 。

(2)、三位半数字直流电流表：四档量程 (200mA 、 20mA 、 $200\ \mu\text{A}$ 、 $20\ \mu\text{A}$) 切换，

精度 $\pm [(0.2\%) + 2 \text{ 个字}]$ 。

3、振荡信号：

(1)、音频振荡器：频率 0.4KHz~10KHz 连续可调输出，幅度 20Vp-p 连续可调输出，二个输出相位 0°（Lv）、180°，Lv 端最大输出电流 0.5A。

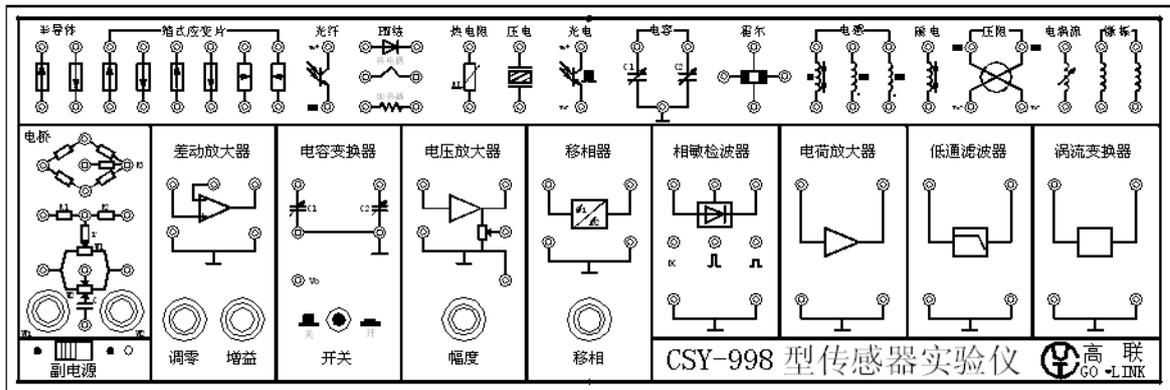
(2)、低频振荡器：频率 3Hz~30Hz 连续可调输出，幅度 20Vp-p 连续可调输出，最大输出电流 0.5A。

4、PC 接口：

最大允许输入电压 DC ±10V。

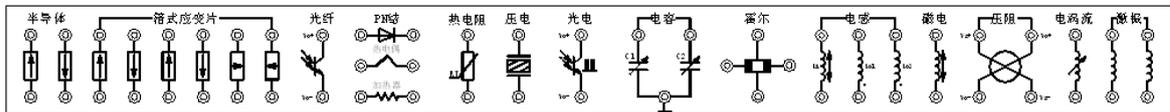
*备注：显示面板功能、配置根据型号不同有差异，以具体型号的实物为准。

(三)、调理电路面板：



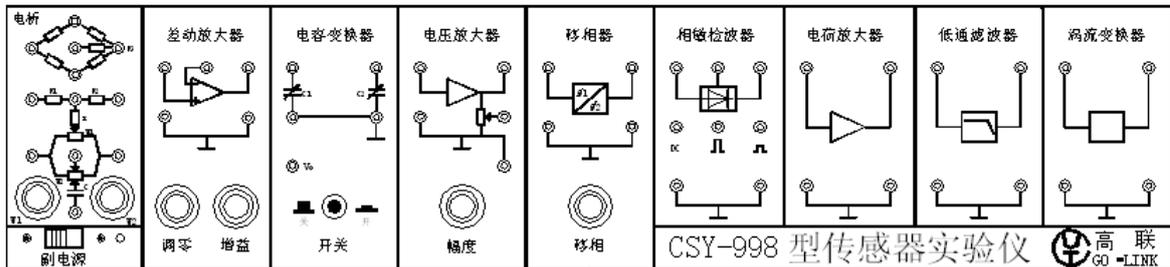
调理电路面板图

1、传感器输出单元：



*备注：根据型号不同有差异，以具体型号的实物为准。

2、调理电路单元：



(1)、电桥：由电桥模型、电桥调平衡网络组成。组成直流电桥时作为应变片、热电阻的变换电路；组成交流电桥时作为调制器。

(2)、差动放大器：可接成同相、反相、差分放大器。通频带 0~10KHz，增益 1~101 倍可调。

(3)、电容变换器：差动式电容传感器的调理电路。由高频振荡器、放大器、二极管环形充放电电路组成。

- (4)、电压放大器：同相输入放大器。通频带 0~10KHz，幅度最大时增益约为 6 倍。
- (5)、移相器：移相范围 $\geq 20^\circ$ ，允许最大输入电压峰峰值为 $V_{p-p}=10V$ 。在解调电路中用于补偿信号的相位。
- (6)、相敏检波器：由整形电路与电子开关电路构成的检波电路。允许最大输入检波信号峰峰值为 $V_{p-p}=10V$ ，通频带 0~10KHz。
- (7)、电荷放大器：电容反馈型放大器。用于放大压电传感器的输出信号。
- (8)、低通滤波器：由 50Hz 的陷波器与低通 RC 滤波器构成。转折频率 35Hz 左右。
- (9)、涡流变换器：涡流传感器的调理电路，涡流线圈是振荡电路中的电感元件之一为变频调幅式电路。

(四)、实验仪供电与尺寸：

供电：AC 220V 50Hz 功率 0.2kW

实验仪尺寸为 520×400×400(mm)。

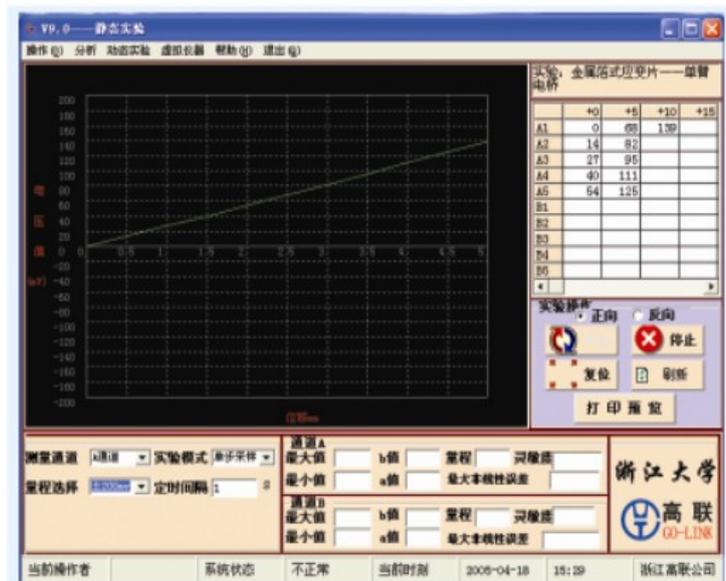
三、 V9.0 数据采集卡及处理软件简介

(一)、数据采集卡及处理软件： V9.0 版

V9.0 版数据采集卡是在原 V8.0 版基础上的一个升级版本，针对目前市售的传感器实验系统所配的采集卡动态范围太小，分辨率和精度过低的缺点，V9.0 版采用了工业级的解决方案，达到了很高的测量精度和动态范围，接口部分采用 RS-232/USB 接口，方便用户的实际使用。该采集卡能完全满足实验的要求。

具体技术指标如下：

- 1、接口标准：RS-232 或 USB 接口
- 2、A/D：12 位
- 3、通道数：A、B 通道
- 4、采样：同步
- 5、采样频率：100KHz(分档可选)
- 6、测量误差：0.2mv
- 7、测量量程：最大可达正负 15V
- 8、支持电压、电流信号直接输入，无需配备转换器
- 9、操作环境：windows98/2000/xp



10、应用软件：CSY-V9.0 数据采集与处理软件

(二)、虚拟仪器软件：V9.0 版

本软件是和 V9.0 采集卡配套使用，以 RS-232/USB 进行通讯，采用 RS-232/USB 标准协议，是一个高效、实时的数据采集系统。该采集系统除了与本公司的 CSY 系列传感器实验仪配合使用外也可单独对外部信号进行采集(信号频率 $f \leq 1\text{kHz}$)。

(三)、系统需求：

- 1、操作系统：Windows 98 /2000/XP 简体中文版
- 2、Intel Pentium III500MHz 或 AMD Athlon700MHz 以上
- 3、128M 以上内存
- 4、至少 400M 以上硬盘空间供软件安装和备份
- 5、有 RS-232/USB 接口
- 6、4 倍速以上的 CD-ROM

(四)、该软件主要功能有以下几点：

- 1、软件按照公司实验指导书编写，大部分实验能用此数据采集软件进行实验操作。
- 2、软件采集设置可分单步采样、定时采样、双向采样、与动态采样。在单步采样时可以以最小二乘法与端点法分析其最大非线性误差或最大迟滞误差，在动态实验时可以分析其输入波形的频率、振幅或转速。
- 3、支持打印功能，能把实验结果在实验结束后即可打印出来。
- 4、采集卡硬件具有程控放大功能，在测量小电压时能有很高精度。
- 5、在数据采集时通讯速率在 V8.0 数据采集卡的基础上有很大提高
- 6、数据采集软件支持 RS232/USB 通讯。
- 7、支持差动输入功能。
- 8、支持双通道数据采样。
- 9、具有虚拟低频示波器功能，并能对波形进行简单频谱、失真度分析。

* 备注：

1、数据采集卡及处理软件不是 CSY-9XX 系列传感器实验仪的配置项，是选配项，不是实验过程中所必需的。

2、数据采集卡选配内置式为单通道并且 RS232 通讯。如要双通道、USB 通讯则选配外置式。软件使用方法参阅软件所附的手册或光盘。

示范实验举例

实验一 应变片单臂特性实验

一、实验目的：了解电阻应变片的工作原理与应用并掌握应变片测量电路。

二、基本原理：电阻应变式传感器是在弹性元件上通过特定工艺粘贴电阻应变片来组成。一种利用电阻材料的应变效应将工程结构件的内部变形转换为电阻变化的传感器，此类传感器主要是通过一定的机械装置将被测量转化成弹性元件的变形，然后由电阻应变片将变形转换成电阻的变化，再通过测量电路将电阻的变化转换成电压或电流变化信号输出。可用于能转化成变形的各种非电物理量的检测，如力、压力、加速度、力矩、重量等，在机械加工、计量、建筑测量等行业应用十分广泛。

1、应变片的电阻应变效应

所谓电阻应变效应是指具有规则外形的金属导体或半导体材料在外力作用下产生应变而其电阻值也会产生相应地改变，这一物理现象称为“电阻应变效应”。以圆柱形导体为例：设其长为：L、半径为r、材料的电阻率为 ρ 时，根据电阻的定义式得

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{\pi \cdot r^2} \quad (1-1)$$

当导体因某种原因产生应变时，其长度L、截面积A和电阻率 ρ 的变化为dL、dA、d ρ 相应的电阻变化为dR。对式(1-1)全微分得电阻变化率dR/R为：

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-2)$$

式中：dL/L为导体的轴向应变变量 ε_L ；dr/r为导体的横向应变变量 ε_r

由材料力学得： $\varepsilon_L = -\mu \varepsilon_r$ (1-3)

式中： μ 为材料的泊松比，大多数金属材料的泊松比为0.3~0.5左右；负号表示两者的变化方向相反。将式(1-3)代入式(1-2)得：

$$\frac{dR}{R} = (1+2\mu) \varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-4)$$

式(1—4)说明电阻应变效应主要取决于它的几何应变(几何效应)和本身特有的导电性能(压阻效应)。

2、应变灵敏度

它是指电阻应变片在单位应变作用下所产生的电阻的相对变化量。

(1)、金属导体的应变灵敏度 K: 主要取决于其几何效应; 可取

$$\frac{dR}{R} \approx (1+2\mu) \varepsilon_x \quad (1-5)$$

其灵敏度系数为:

$$K = \frac{dR}{\varepsilon_x R} = (1+2\mu)$$

金属导体在受到应变作用时将产生电阻的变化, 拉伸时电阻增大, 压缩时电阻减小, 且与其轴向应变成正比。金属导体的电阻应变灵敏度一般在 2 左右。

(2)、半导体的应变灵敏度: 主要取决于其压阻效应; $dR/R < \approx d\rho/\rho$ 。半导体材料之所以具有较大的电阻变化率, 是因为它有远比金属导体显著得多的压阻效应。在半导体受力变形时会暂时改变晶体结构的对称性, 因而改变了半导体的导电机理, 使得它的电阻率发生变化, 这种物理现象称之为半导体的压阻效应。且不同材质的半导体材料在不同受力条件下产生的压阻效应不同, 可以是正(使电阻增大)的或负(使电阻减小)的压阻效应。也就是说, 同样是拉伸变形, 不同材质的半导体将得到完全相反的电阻变化效果。

半导体材料的电阻应变效应主要体现为压阻效应, 可正可负, 与材料性质和应变方向有关, 其灵敏度系数较大, 一般在 100 到 200 左右。

3、贴片式应变片应用

在贴片式工艺的传感器上普遍应用金属箔式应变片, 贴片式半导体应变片(温漂、稳定性、线性度不好而且易损坏)很少应用。一般半导体应变采用 N 型单晶硅为传感器的弹性元件, 在它上面直接蒸镀扩散出半导体电阻应变薄膜(扩散出敏感栅), 制成扩散型压阻式(压阻效应)传感器。

* 本实验以金属箔式应变片为研究对象。

4、箔式应变片的基本结构

应变片是在用苯酚、环氧树脂等绝缘材料的基板上, 粘贴直径为 0.025mm 左右的金属丝或金属箔制成, 如图 1—1 所示。

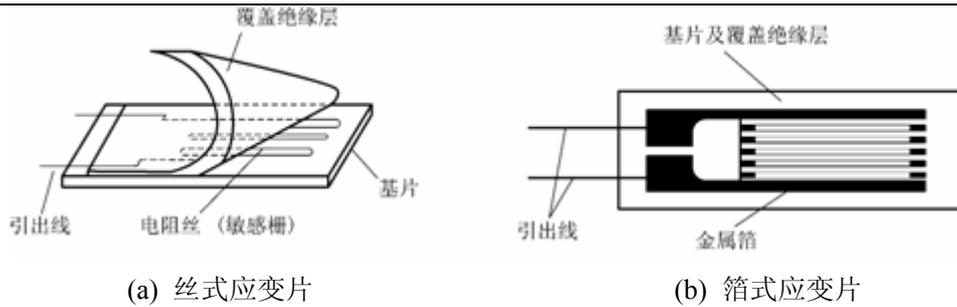


图 1—1 应变片结构图

金属箔式应变片就是通过光刻、腐蚀等工艺制成的应变敏感元件，与丝式应变片工作原理相同。电阻丝在外力作用下发生机械变形时，其电阻值发生变化，这就是电阻应变效应，描述电阻应变效应的关系式为： $\Delta R / R = K \varepsilon$ 式中： $\Delta R / R$ 为电阻丝电阻相对变化， K 为应变灵敏系数， $\varepsilon = \Delta L / L$ 为电阻丝长度相对变化。

5、测量电路

为了将电阻应变式传感器的电阻变化转换成电压或电流信号，在应用中一般采用电桥电路作为其测量电路。电桥电路具有结构简单、灵敏度高、测量范围宽、线性度好且易实现温度补偿等优点。能较好地满足各种应变测量要求，因此在应变测量中得到了广泛的应用。电桥电路按其工作方式分有单臂、双臂和全桥三种，单臂工作输出信号最小、线性、稳定性较差；双臂输出是单臂的两倍，性能比单臂有所改善；全桥工作时的输出是单臂时的四倍，性能最好。因此，为了得到较大的输出电压信号一般都采用双臂或全桥工作。基本电路如图 1—2 (a)、(b)、(c) 所示。

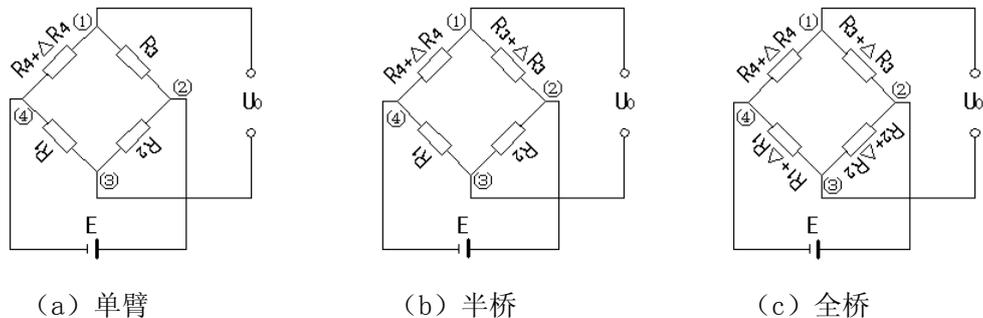


图 1—2 应变片测量电路

(a)、单臂

$$\begin{aligned}
 U_o &= U_{①} - U_{③} \\
 &= \left[(R_4 + \Delta R_4) / (R_4 + \Delta R_4 + R_3) - R_1 / (R_1 + R_2) \right] E \\
 &= \left\{ [(R_1 + R_2)(R_4 + \Delta R_4) - R_1(R_3 + R_4 + \Delta R_4)] / [(R_3 + R_4 + \Delta R_4)(R_1 + R_2)] \right\} E
 \end{aligned}$$

设 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，且 $\Delta R_4 / R_4 = \Delta R / R \ll 1$ ， $\Delta R / R = K \varepsilon$ 。

$$\text{则 } U_o \approx (1 / 4) (\Delta R_4 / R_4) E = (1 / 4) (\Delta R / R) E = (1 / 4) K \varepsilon E$$

(b)、双臂(半桥)

同理: $U_o \approx (1/2)(\Delta R/R)E = (1/2)K \epsilon E$

(c)、全桥

同理: $U_o \approx (\Delta R/R)E = K \epsilon E$

6、箔式应变片单臂电桥实验原理图

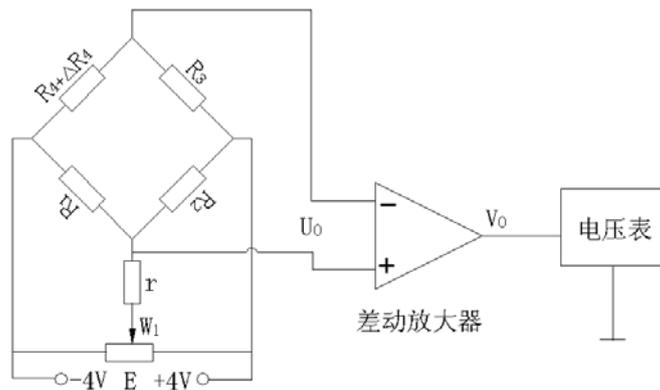


图 1—3 应变片单臂电桥实验原理图

图中 R_1 、 R_2 、 R_3 为 350Ω 固定电阻， R_4 为应变片； W_1 和 r 组成电桥调平衡网络，供桥电源直流 $\pm 4V$ 。桥路输出电压 $U_o \approx (1/4)(\Delta R_4/R_4)E = (1/4)(\Delta R/R)E = (1/4)K \epsilon E$ 。

三、需用器件与单元：机头中的应变梁的应变片、测微头；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板中传感器输出单元中的箔式应变片、调理电路单元中的电桥、差动放大器； $4\frac{1}{2}$ 位数显万用表（自备）。

四、需用器件与单元介绍：

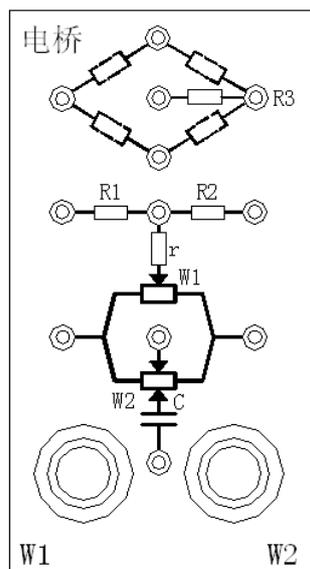


图 1—4 电桥面板图

1、图 1—4 调理电路面板中的电桥单元。图中：

- (1)菱形虚框为无实体的电桥模型(为实验者组桥参考而设，无其它实际意义)。
- (2) $R_1=R_2=R_3=350 \Omega$ 是固定电阻，为组成单臂应变和半桥应变而配备的其它桥臂电阻。
- (3) W_1 电位器、 r 电阻为电桥直流调节平衡网络， W_2 电位器、 C 电容为电桥交流调节平衡网络。

2、图 1—5 为差动放大器原理图与调理电路中的差动放大器单元面板图。

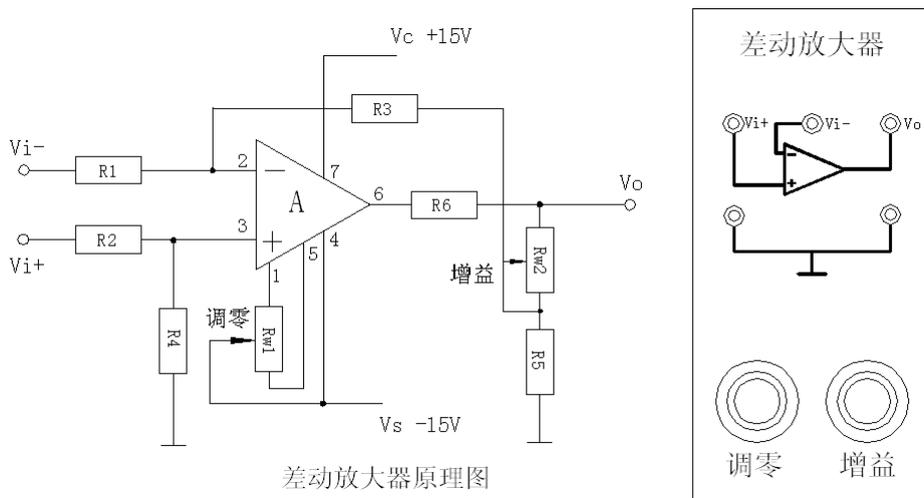


图 1—5 差动放大器原理与面板图

图中：左图是原理图，A 是差动输入的放大器；右图为面板图。

*** 3、附：测微头的组成与使用：**

测微头组成和读数如下图 1—6 所示。

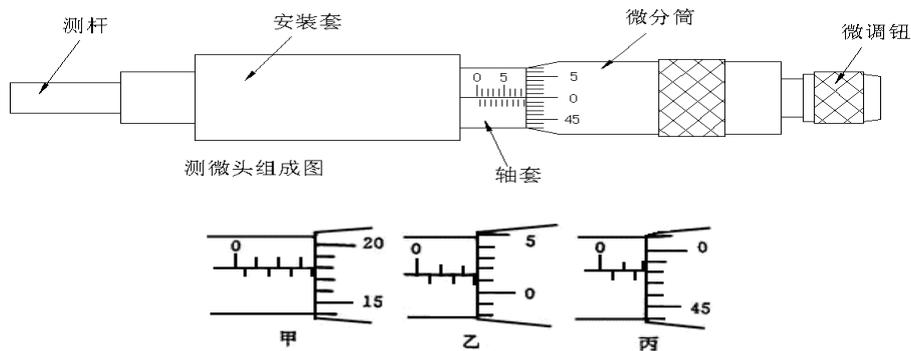


图 1—6 测位头组成与读数

测微头组成：测微头由不可动部分中的安装套（应变梁的测微头无安装套）、轴套和可动部分中的测杆、微分筒、微调钮组成。

测微头读数与使用：测微头的安装套便于在支架座上固定安装，轴套上的主尺有两排刻度线，标有数字的是整毫米刻线(1mm / 格)，另一排是半毫米刻线(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，测杆沿轴方向移动微小位移 0.01 毫米，这也叫测微头的分度值。

测微头的读数方法是先读轴套主尺上露出的刻度数值，注意半毫米刻线；再读与主尺横线对准微分筒上的数值、可以估读 1 / 10 分度，如图 1—6 甲读数为 3.678mm，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 1—6 乙已过零则读 2.514mm；如图 1—6 丙未过零，则不应读为 2mm，读数应为 1.980mm。

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。

五、实验步骤：

1、在应变梁自然状态（不受力）的情况下，用 $4\frac{1}{2}$ 位数显万用表 2k Ω 电阻档测量所有应变片阻值；在应变梁受力状态（用手压、提梁的自由端）的情况下，测应变片阻值，观察一下应变片阻值变化情况（标有上下箭头的 4 片应变片纵向受力阻值有变化；标有左右箭头的 2 片应变片 横向不受力阻值无变化，是温度补偿片）。如下图 1—7 所示。

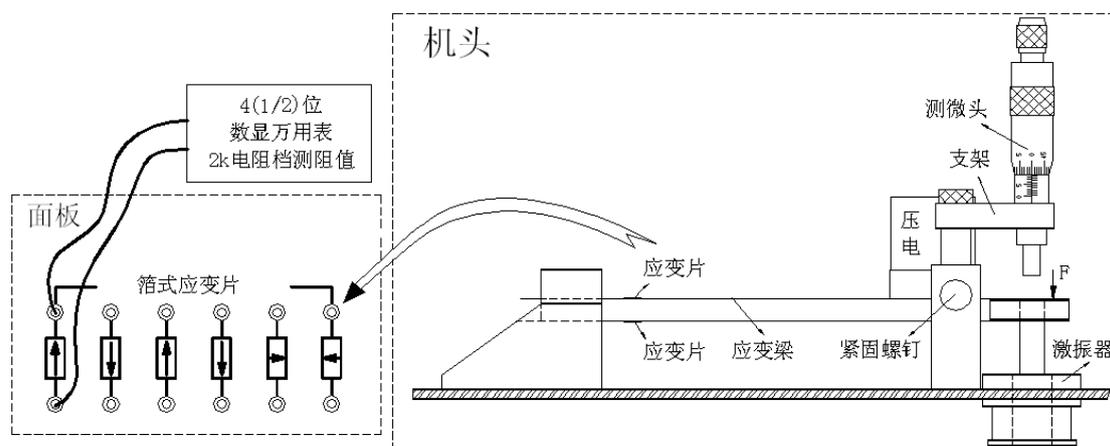


图 1—7 观察应变片阻值变化情况示意图

2、差动放大器调零点：按下图 1—8 示意接线。将 F/V 表（或电压表）的量程切换开关切换到 2V 档，合上主、副电源开关，将差动放大器的增益电位器按顺时针方向轻轻转到底后再逆向回转一点点（放大器的增益为最大，回转一点点的目的：电位器触点在根部估计会接触不良），调节差动放大器的调零电位器，使电压表显示电压为零。差动放大器的零点调节完成，关闭主电源。

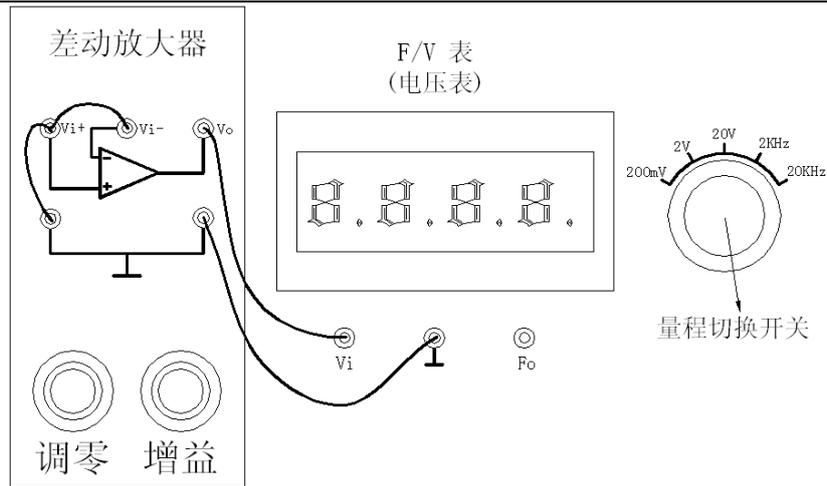


图 1—8 差放调零接线图

3、应变片单臂电桥特性实验：

(1)将±2V~±10V 步进可调直流稳压电源切换到 4V 档，将主板上传感器输出单元中的箔式应变片(标有上下箭头的 4 片应变片中任意一片为工作片)与电桥单元中 R₁、R₂、R₃ 组成电桥电路，电桥的一对角接±4V 直流电源，另一对角作为电桥的输出接差动放大器的二输入端，将 W₁ 电位器、r 电阻直流调节平衡网络接入电桥中(W₁ 电位器二固定端接电桥的±4V 电源端、W₁ 的活动端 r 电阻接电桥的输出端)，如图 1—9 示意接线(粗细曲线为连接线)。

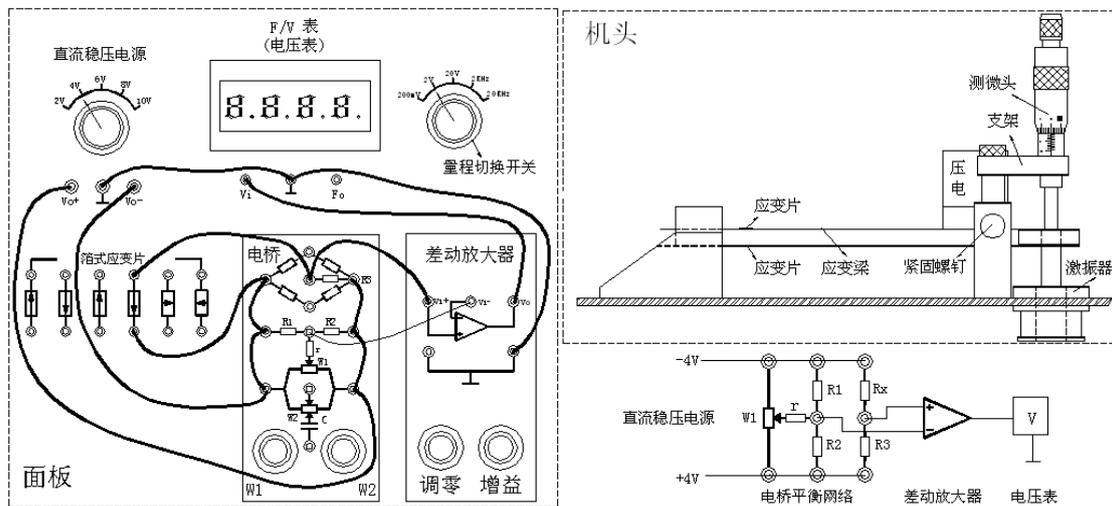


图 1—9 应变片单臂电桥特性实验原理图与接线示意图

(2)检查接线无误后合上主电源开关，当机头上应变梁自由端的测微头离开自由端（梁处于自然状态，图 1—7 机头所示）时调节电桥的直流调节平衡网络 W₁ 电位器，使电压表显示为 0 或接近 0。

(3)在测微头吸合梁的自由端前调节测微头的微分筒，使测微头的读数为 10mm 左右（测微头微分筒的 0 刻度线与测微头轴套的 10mm 刻度线对准）；再松开测微头支架轴套的紧固螺

钉，调节测微头支架高度使梁吸合后进一步调节支架高度，同时观察电压表显示绝对值尽量为最小时固定测微头支架高度（拧紧紧固螺钉，图 1—9 机头所示）。仔细微调测微头的微分筒使电压表显示值为 0（梁不受力处于自然状态），这时的测微头刻度线位置作为梁位移的相对 0 位位移点。首先确定某个方向位移，以后每调节测微头的微分筒一周产生 0.5mm 位移，根据表 1 位移数据依次增加 0.5mm 并读取相应的电压值填入表 1 中；然后反方向调节测微头的微分筒使电压表显示 0V（这时测微头微分筒的刻度线不在原来的 0 位位移点位置上，是由于测微头存在机械回程差，以电压表的 0V 为标准作为 0 位位移点并取固定的相对位移 ΔX 消除了机械回程差），再根据表 1 位移数据依次反方向增加 0.5mm 并读取相应的电压值填入表 1 中。***注：调节测微头要仔细，微分筒每转一周 $\Delta X=0.5\text{mm}$ ；如调节过量再回调，则产生回程差。**

表 1 应变片单臂电桥特性实验数据：

位移(mm)	-8.0	……	-1.0	-0.5	0	+0.5	+1.0	……	+8.0
电压(mV)									

(4)根据表 1 数据画出实验曲线并计算灵敏度 $S = \Delta V / \Delta X$ (ΔV 输出电压变化量, ΔX 位移变化量) 和非线性误差 δ (用最小二乘法), $\delta = \Delta_m / yFS \times 100\%$ 式中 Δ_m 为输出值 (多次测量时为平均值) 与拟合直线的最大偏差; yFS 满量程输出平均值, 此处为相对总位移量。实验完毕, 关闭电源。

六、思考题:

- 1、 ΔR 转换成 ΔV 输出用什么方法?
- 2、根据图 4 机头中应变梁结构, 梁的自由端往下施力时上、下梁片中应变片的应变方向(是拉?还是压?)。
- 3、还可以用什么方法消除测微头的机械回程差? 提示: 实验步骤(3)中不设 0 位位移点, 直接从位移最大处单方向调节测微头。

实验二 应变片半桥特性实验

一、实验目的：了解应变片半桥（双臂）工作特点及性能。

二、基本原理：应变片基本原理参阅实验一。应变片半桥特性实验原理如图 2—1 所示。不同受力方向的两片应变片（上、下二片梁的应变片应力方向不同）接入电桥作为邻边，输出灵敏度提高，非线性得到改善。其桥路输出电压 $U_o \approx (1/2)(\Delta R/R)E = (1/2)K \epsilon E$ 。

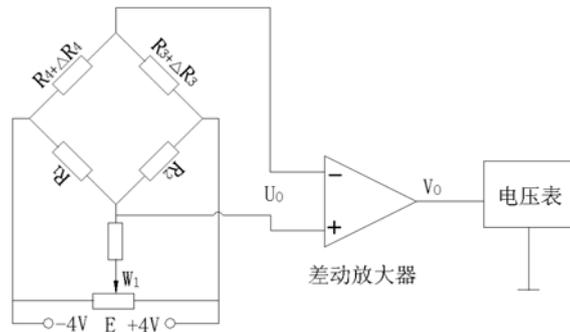


图 2—1 应变片半桥特性实验原理图

三、需用器件与单元：机头中的应变梁的应变片、测微头；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板中传感器输出单元中的箔式应变片、调理电路单元中的电桥、差动放大器。

四、实验步骤：

除实验接线按图 2—2 接线即电桥单元中 R_1 、 R_2 与相邻的二片应变片组成电桥电路外。实验步骤和实验数据处理方法与实验一完全相同。实验完毕，关闭电源。

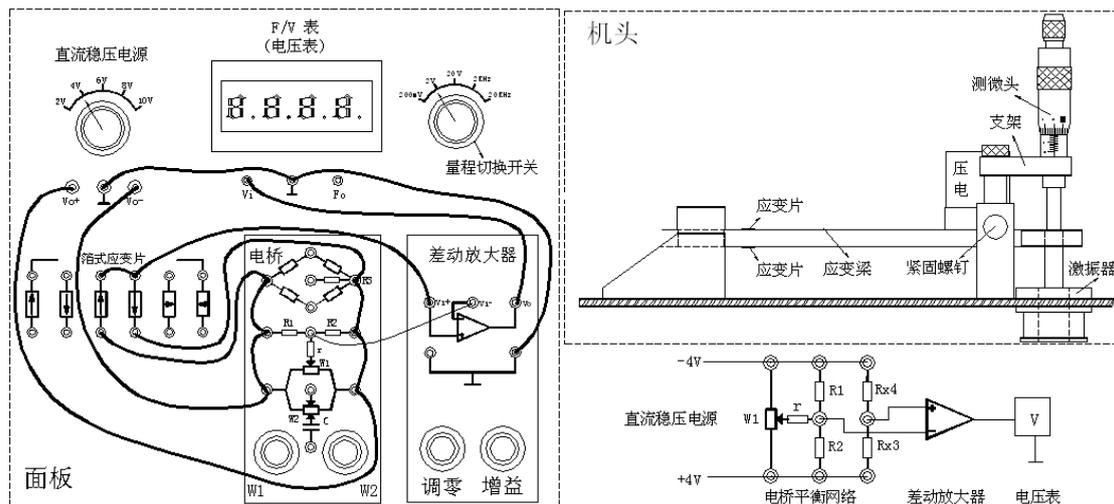


图 2—2 应变片半桥实验原理图与接线示意图

五、思考题：

半桥测量时两片不同受力状态的电阻应变片（相邻的二片应变片）接入电桥时，应接在：

- (1) 对边？(2) 邻边？为什么？

实验三 应变片全桥特性实验

一、实验目的：了解应变片全桥工作特点及性能。

二、基本原理：应变片基本原理参阅实验一。应变片全桥特性实验原理如图 3—1 所示。

应变片全桥测量电路中，将受力方向相同的两应变片接入电桥对边，相反的应变片接入电桥邻边。当应变片初始阻值： $R_1=R_2=R_3=R_4$ ，其变化值 $\Delta R_1=\Delta R_2=\Delta R_3=\Delta R_4$ 时，其桥路输出电压 $U_0 \approx (\Delta R / R)E = K \varepsilon E$ 。其输出灵敏度比半桥又提高了一倍，非线性得到改善。

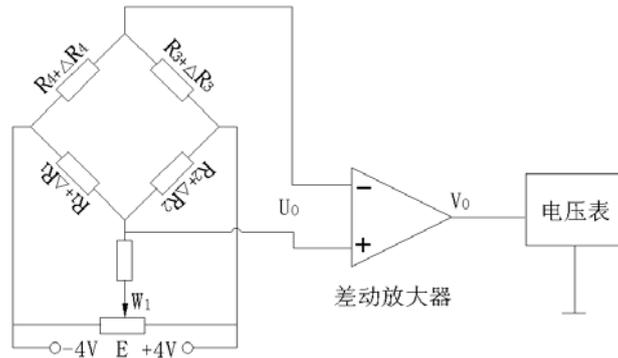


图 3—1 应变片全桥特性实验原理图

三、需用器件和单元：机头中的应变梁的应变片、测微头；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板中传感器输出单元中的箔式应变片、调理电路单元中的电桥、差动放大器。

四、实验步骤：

除实验接线按图 3—2 示意接线，四片应变片组成电桥电路外。实验步骤和实验数据处理方法与实验一完全相同。实验完毕，关闭电源。

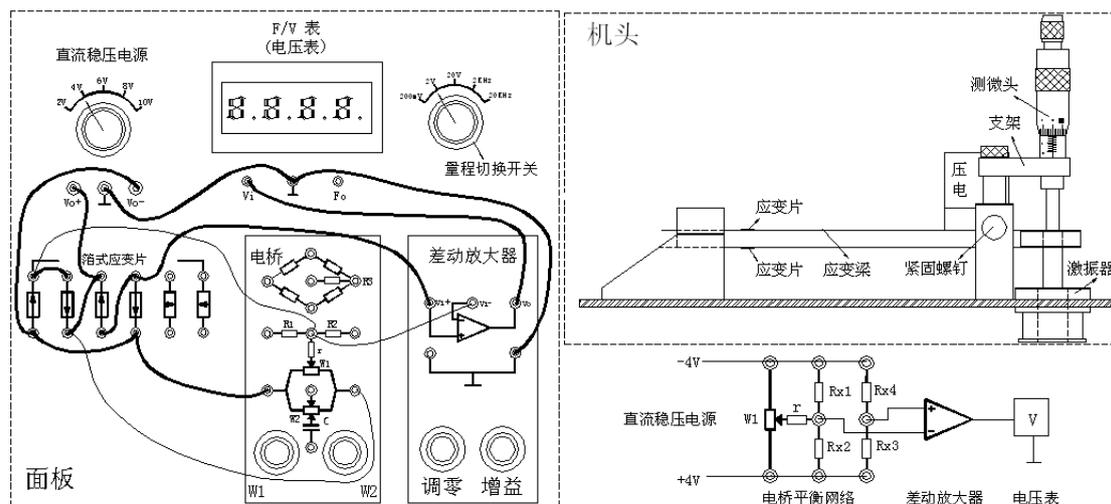


图 3—2 应变片全桥特性实验原理图与接线示意图

五、思考题：

应变片组桥时应注意什么问题？

*实验四 应变片单臂、半桥、全桥特性比较

一、实验目的：比较单臂、半桥、全桥输出时的灵敏度和非线性度，得出相应的结论。

二、基本原理：如图4 (a)、(b)、(c)为应变片单臂、半桥和全桥测量电路原理图。它们输出电压分别为：

a) 单臂

$$\begin{aligned}
 U_o &= U_{①} - U_{③} \\
 &= \left(\frac{R_4 + \Delta R_4}{R_4 + \Delta R_4 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) E \\
 &= \left\{ \frac{(R_1 + R_2)(R_4 + \Delta R_4) - R_1(R_3 + R_4 + \Delta R_4)}{(R_3 + R_4 + \Delta R_4)(R_1 + R_2)} \right\} E
 \end{aligned}$$

设 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，且 $\Delta R_4 / R_4 = \Delta R / R \ll 1$ ， $\Delta R / R = K \varepsilon$ 。

则 $U_o \approx (1/4)(\Delta R_4 / R_4)E = (1/4)(\Delta R / R)E = (1/4)K \varepsilon E$

(b)、双臂(半桥)

同理： $U_o \approx (1/2)(\Delta R / R)E = (1/2)K \varepsilon E$

(c)、全桥

同理： $U_o \approx (\Delta R / R)E = K \varepsilon E$

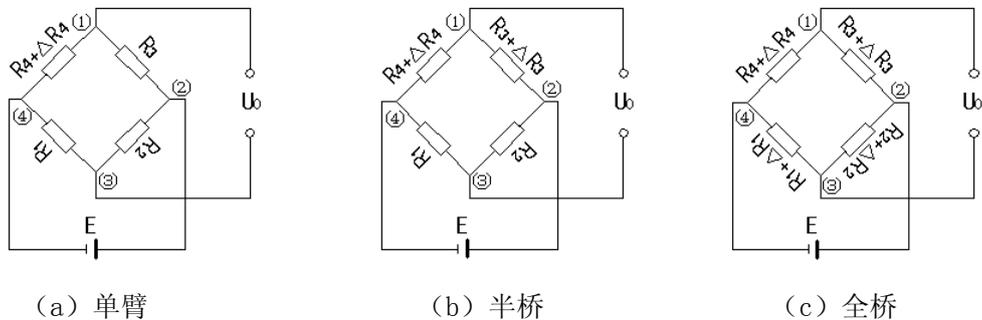


图4 应变测量电路

三、需用器件与单元：机头中的应变梁的应变片、测微头；显示面板中的F/V表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板中传感器输出单元中的箔式应变片、调理电路单元中的电桥、差动放大器。

四、实验步骤：根据实验一、二、三所得的结果进行单臂、半桥和全桥输出的灵敏度和非线性度分析比较（注意：实验一、二、三中的放大器增益必须相同）。实验完毕，关闭电源。

实验五 应变片的温度影响实验

一、实验目的：了解温度对应变片测试系统的影响。

二、基本原理：电阻应变片的温度影响，主要来自两个方面。敏感栅丝的温度系数，应变栅的线膨胀系数与弹性体（或被测试件）的线膨胀系数不一致会产生附加应变。因此当温度变化时，在被测体受力状态不变时，输出会有变化。

三、需用器件与单元：机头中的应变梁的应变片、加热器；；显示面板中的 F/V 表（或电压表）、±2V~±10V 步进可调直流稳压电源、-15V 电源；调理电路面板中传感器输出单元中的箔式应变片、加热器；调理电路单元中的电桥、差动放大器。

四、实验步骤：

1、按实验一 应变片单臂特性实验步骤调试、实验。调节测微头使梁的自由端产生较大位移（如实验一表 1 中绝对值最大位移处）时读取记录电压表的显示值为 U_{o1} ，并且继续保留此状态不变。

2、将显示面板中的-15V 电源与调理电路面板中传感器输出单元中的加热器相连，使加热器对应变片施热，如下图 5 所示。数分钟后待数显表电压显示基本稳定后，记下读数 U_{ot} ，则 $U_{ot}-U_{o1}$ 即为温度变化的影响。计算这一温度变化产生的相对误差：

$$\delta = \frac{U_{ot} - U_{o1}}{U_{o1}} \times 100\%$$

实验完毕，关闭电源。

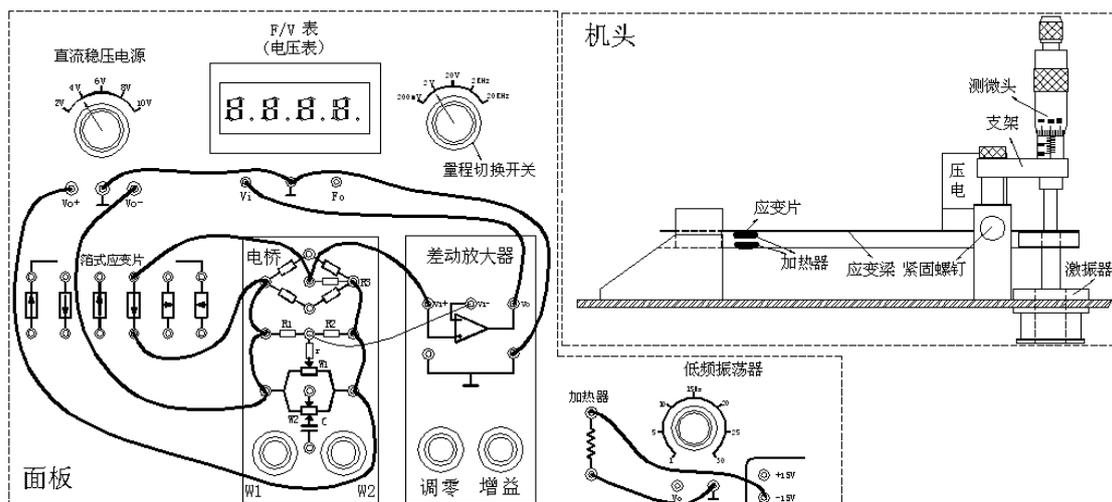


图 5 应变片温度影响实验

*实验六 应变片温度补偿实验

一、实验目的：了解温度对应变片测试系统的影响及补偿方法。

二、基本原理：实验五已知温度的变化对应变片是有影响的。当二片完全相同的应变片处于同一温度场时，温度的影响是相同的，将实验五中的 R3 换成温度补偿应变片并与固定阻 R1、R2 组成电桥测量电路，从理论上来说就能消除温度的影响。

三、需用器件与单元：机头中的应变梁的应变片、加热器；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源、 $-15V$ 电源；调理电路面板中传感器输出单元中的箔式应变片、加热器；调理电路单元中的电桥、差动放大器。

四、实验步骤：

提示：温度补偿实验接线如下图 6 所示。按实验五步骤、方法实验（与实验五的唯一区别：用带横向箭头的补偿应变片替换桥路中的固定电阻 R3），温度补偿实验接线如下图 6 所示。比较实验五、实验六二者结果。实验完毕关闭电源。

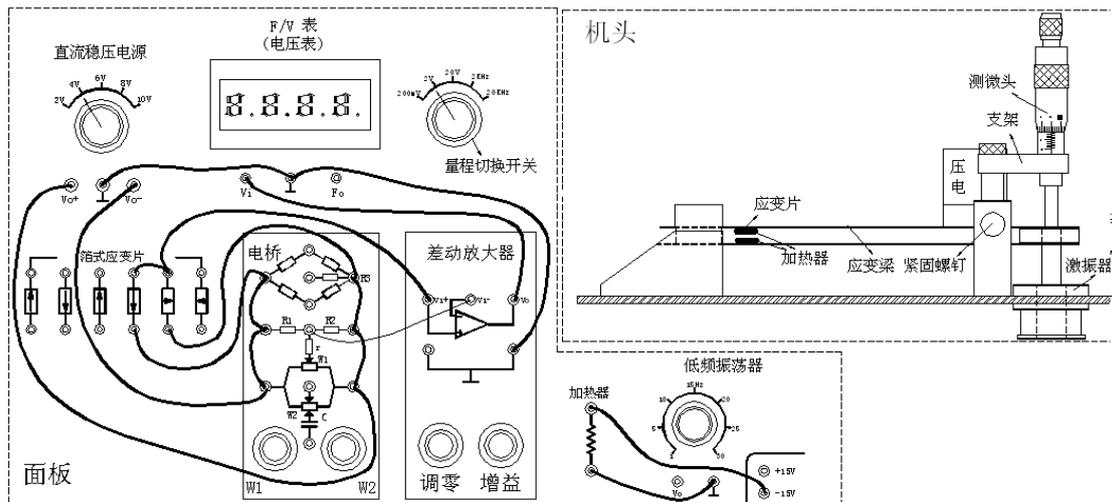


图 6 应变片温度补偿实验接线图

实验七 应变直流全桥的应用—电子秤实验

一、实验目的：了解应变直流全桥的应用及电路的标定。

二、基本原理：常用的称重传感器就是应用了箔式应变片及其全桥测量电路。数字电子秤实验原理如图 7—1。本实验只做放大器输出 V_o 实验，通过对电路的标定使电路输出的电压值为重量对应值，电压量纲 (V) 改为重量量纲 (g) 即成为一台原始电子秤。

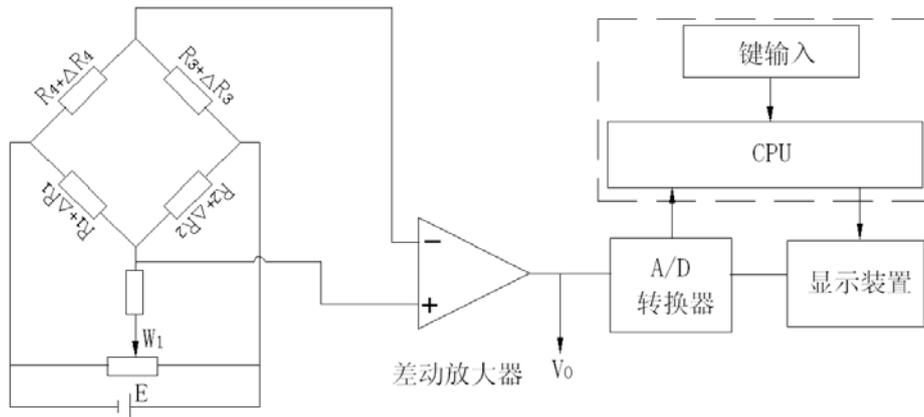


图 7—1 数字电子秤原理框图

三、需用器件与单元：机头中的应变梁的应变片；显示面板中的 F/V 表 (或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板传感器输出单元中的箔式应变片；调理电路单元中的电桥、差动放大器；砝码 (20g / 只)。

四、实验步骤：

1、差动放大器调零点：按图 7—2 示意接线。将 F / V 表 (或电压表) 的量程切换开关切换到 2V 档，合上主、副电源开关，将差动放大器的增益电位器按顺时针方向轻轻转到底后再逆向回转一点点 (放大器的增益为最大，回转一点点的目的：电位器触点在根部估计会接触不良)，调节差动放大器的调零电位器，使电压表显示电压为零。差动放大器的零点调节完成，关闭主电源。

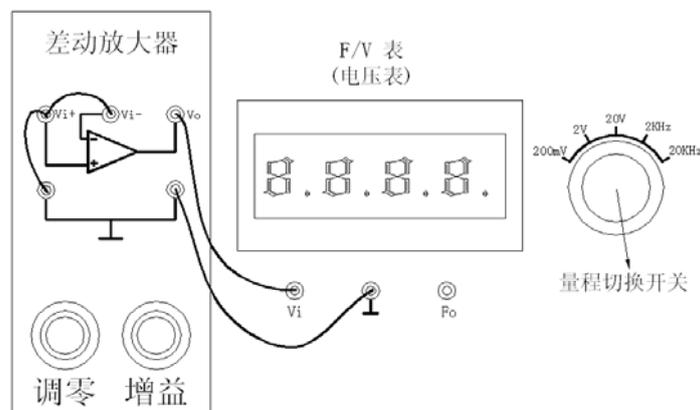


图 7—2 差放调零接线图

2、将±2V~±10V 步进可调直流稳压电源切换到 4V 档，按图 7—3 接线，检查接线无误后合上主电源开关。在梁的自由端无砝码时，调节电桥中的 W1 电位器，使数显表显示为 0.000V。将 10 只砝码全部置于梁的自由端上（尽量放在中心点），调节差动放大器的增益电位器，使数显表显示为 0.200V (2V 档测量) 或 -0.200V。

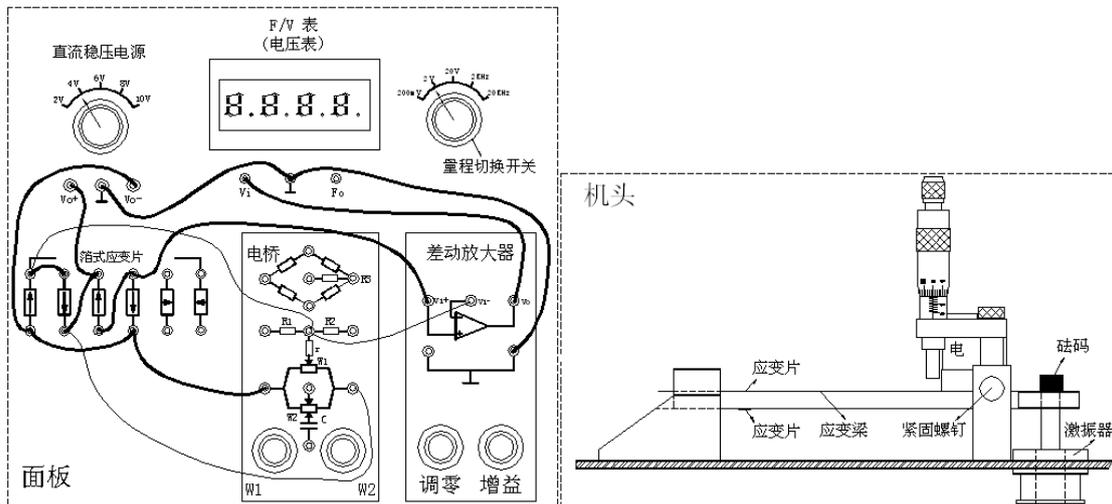


图 7—3 电子秤实验接线示意图

3、拿去梁的自由端上所有砝码，如数显电压表不显示 0.000V 则调节差动放大器的调零电位器，使数显表显示为 0.000V。再将 10 只砝码全部置于振动台上（尽量放在中心点），调节差动放大器的增益电位器，使数显表显示为 0.200V (2V 档测量) 或 -0.200V。

4、重复 3 步骤的标定过程，一直到误差较小为止，把电压量纲 V 改为重量纲 g，就可以称重，成为一台原始的电子秤。

5、把砝码依次放在梁的自由端上，并依次记录重量和电压数据填入下表 5。

6、根据数据画出实验曲线，计算误差与线性度。

表 7 电子秤实验数据

重量 (g)									
电压 (mV)									

7、在梁的自由端上放上笔、钥匙之类的小东西称一下重量。实验完毕，关闭电源。

实验八 移相器、相敏检波器实验

一、实验目的：了解移相器、相敏检波器的工作原理。

二、基本原理：

1、移相器工作原理：

图 8—1 为移相器电路原理图与调理电路中的移相器单元面板图。

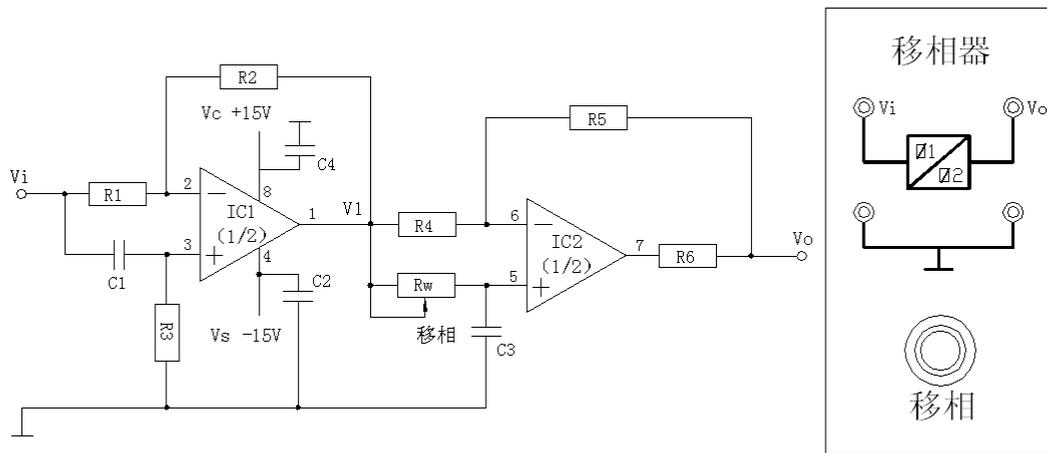


图 8—1 移相器原理图与面板图

图中，IC1、R1、R2、R3、C1 构成一阶移相器（超前），在 R2=R1 的条件下，其幅频特性和相频特性分别表示为：

$$K_{F1}(j\omega) = V_i/V_1 = -(1 - j\omega R_3 C_1) / (1 + j\omega R_3 C_1)$$

$$K_{F1}(\omega) = 1$$

$$\Phi_{F1}(\omega) = -\pi - 2\text{tg}^{-1} \omega R_3 C_1$$

其中： $\omega = 2\pi f$ ，f 为输入信号频率。同理由 IC2、R4、R5、Rw、C3 构成另一个一阶移相器（滞后），在 R5=R4 条件下的特性为：

$$K_{F2}(j\omega) = V_o/V_1 = -(1 - j\omega R_w C_3) / (1 + j\omega R_w C_3)$$

$$K_{F2}(\omega) = 1$$

$$\Phi_{F2}(\omega) = -\pi - 2\text{tg}^{-1} \omega R_w C_3$$

由此可见，根据幅频特性公式，移相前后的信号幅值相等。根据相频特性公式，相移角度的大小和信号频率 f 及电路中阻容元件的数值有关。显然，当移相电位器 Rw=0，上式中 $\Phi_{F2}=0$ ，因此 Φ_{F1} 决定了图 7—1 所示的二阶移相器的初始移相角：

$$\text{即 } \Phi_F = \Phi_{F1} = -\pi - 2\text{tg}^{-1} 2\pi f R_3 C_1$$

若调整移相电位器 Rw，则相应的移相范围为： $\Delta \Phi_F = \Phi_{F1} - \Phi_{F2} = -2\text{tg}^{-1} 2\pi f R_3 C_1 + 2\text{tg}^{-1} 2\pi f \Delta R_w C_3$

已知 R3=10kΩ，C1=6800p， $\Delta R_w=10\text{k}\Omega$ ，C3=0.022μF，如果输入信号频率 f 一旦确定，即可计算出图 8—1 所示二阶移相器的初始移相角和移相范围。

2、相敏检波器工作原理：

图 8—2 为相敏检波器（开关式）原理图与调理电路中的相敏检波器面板图。图中，AC 为交流参考电压输入端，DC 为直流参考电压输入端，Vi 端为检波信号输入端，Vo 端为检波输出端。

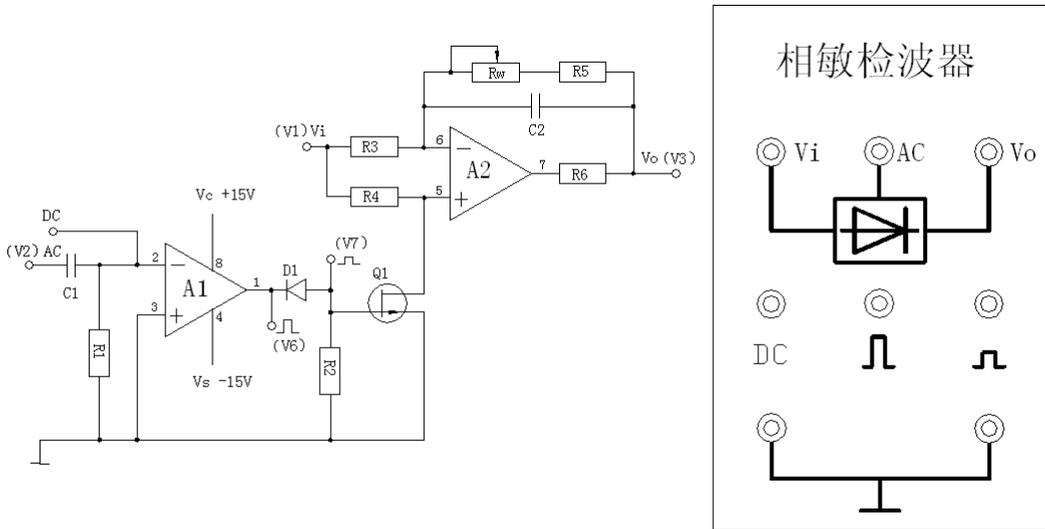


图 8—2 相敏检波器原理图与面板图

原理图中各元器件的作用：C1 交流耦合电容并隔离直流；A1 反相过零比较器，将参考电压正弦波转换成矩形波（开关波+14V ~ -14V）；D1 二极管箝位得到合适的开关波形 V7 ≤ 0V（0 ~ -14V），为电子开关 Q1 提供合适的工作点；Q1 是结型场效应管，工作在开或关的状态；A2 工作在反相器或跟随器状态；R6 限流电阻起保护集成块作用。

关键点：Q1 是由参考电压 V7 矩形波控制的开关电路。当 V7=0V 时，Q1 导通，使 A2 的同相输入 5 端接地成为倒相器，即 V3=-V1 (Vo=-Vi)；当 V7<0V 时，Q1 截止（相当于 A2 的 5 端接地断开），A2 成为跟随器，即 V3=V1 (Vo=Vi)。相敏检波器具有鉴相特性，输出波形 V3 的变化由检波信号 V1 (Vi) 与参考电压波形 V2 (AC) 之间的相位决定。下图 8—3 为相敏检波器的工作时序图。

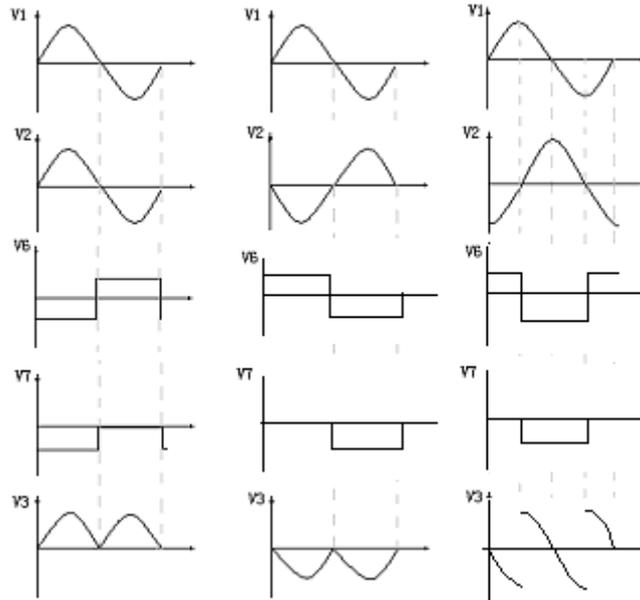


图 8—3 相敏检波器工作时序图

三、需用器件与单元：显示面板中的 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源、音频振荡器；
调理电路面板中的移相器、相敏检波器单元；双踪示波器(自备)。

四、实验步骤：

(一) 移相器实验

1、调节显示面板音频振荡器的幅度为最小（幅度旋钮逆时针轻轻转到底），按图 8—4 示意接线，检查接线无误后，合上主、副电源开关，调节音频振荡器的频率为 $f = 1\text{kHz}$ ，幅度适中 ($2V \leq V_{p-p} \leq 8V$)。

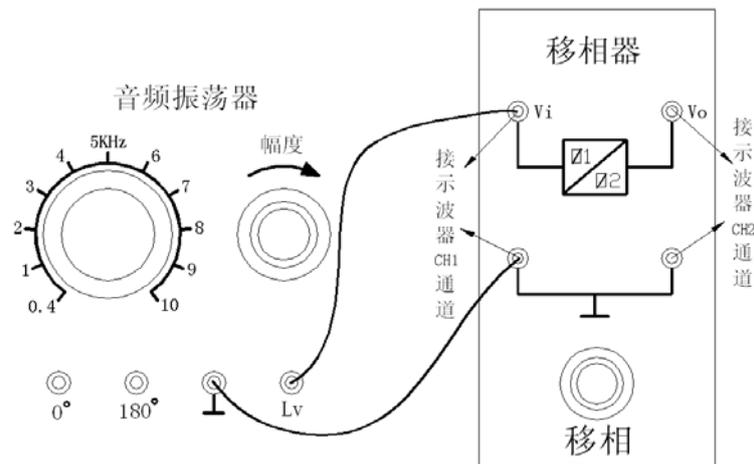


图 8—4 移相器实验接线图

2、正确选择双线（双踪）示波器的“触发”方式及其它 (TIME/DIV：在 $0.5\text{ms} \sim 0.1\text{ms}$ 范围内选择；VOLTS/DIV： $1V \sim 5V$ 范围内选择) 设置。

3、调节移相器的移相电位器（逆时针到底 $0K\Omega \sim$ 顺时针到底 $10K\Omega$ 变化范围），用示波器可测定移相器的初始移相角 ($\Phi_F = \Phi_{F1}$) 和移相范围 $\Delta\Phi_F$ 。

4、改变输入信号 L_v 频率，调节移相电位器观察相应的移相变化。测试完毕关闭主电源。

(二) 相敏检波器实验

1、将显示面板中的±2V~±10V 步进可调直流稳压电源切换到 2V 档，调节显示面板音频振荡器的幅度为最小（幅度旋钮逆时针轻轻转到底），再按图 8—5 示意接线。检查接线无误后合上主电源，调节音频振荡器频率 $f=5\text{KHz}$ 左右，幅度 $V_{p-p}=5\text{V}$ ；结合相敏检波器的原理图和工作原理，分析观察相敏检波器的输入、输出波形关系。

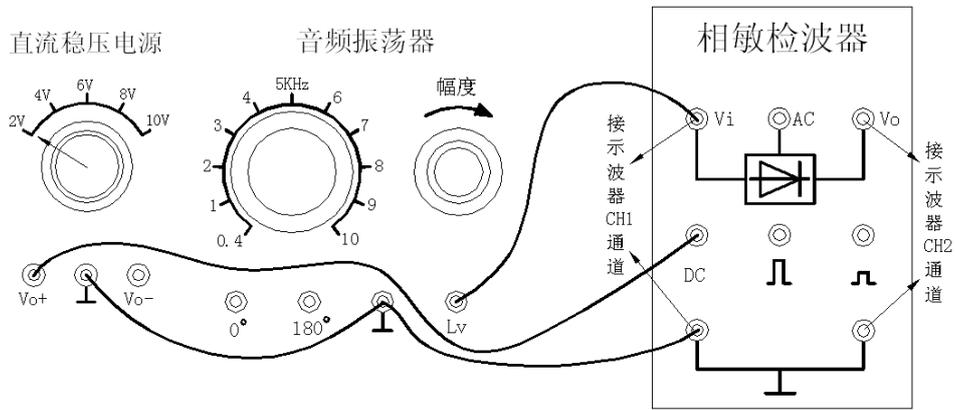


图 8—5 相敏检波器跟随、倒相实验接线示意图

2、将相敏检波器的 DC 参考电压改接到 -2V (V_{o-})，观察相敏检波器的输入、输出波形关系。关闭主电源。

3、按图 8—6 示意图接线，合上主电源，分别调节移相电位器和音频信号幅度，结合相敏检波器的原理图和工作原理，分析观察相敏检波器的输入、输出波形关系。

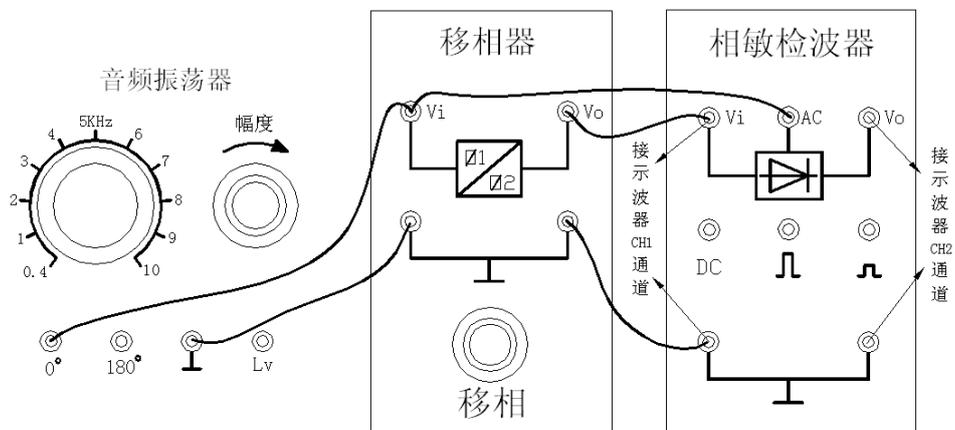


图 8—6 相敏检波器检波实验

4、将相敏检波器的 AC 参考电压改接到 180° ，分别调节移相电位器和音频信号幅度，观察相敏检波器的输入、输出波形关系。

5、作出相敏检波器检波实验的工作时序波形图，实验完毕关闭主、副电源。

五、思考题：

通过移相器、相敏检波器的实验是否对二者的工作原理有了更深入的理解？能理解相敏检波器同时具有鉴幅、鉴相特性吗？

实验九 应变片交流全桥的应用(应变仪)—振动测量实验

一、实验目的：了解利用应变交流电桥测量振动的原理与方法。

二、基本原理：图 9—1 是应变片测振动的实验原理方块图。粘贴在应变梁上的应变片组成交流电桥，当应变梁的自由端受到振动信号 $F(t)$ 作用而振动，使粘贴在应变梁上的应变片产生相应的应变信号 dR/R ，应变信号 dR/R 由振荡器提供的载波信号 $y(t)$ 经交流电桥调制成微弱调幅波，再经差动放大器放大为 $u_1(t)$ ， $u_1(t)$ 经相敏检波器检波解调为 $u_2(t)$ ， $u_2(t)$ 经低通滤波器滤除高频载波成分后输出应变片检测到的振动信号 $u_3(t)$ (调幅波的包络线)， $u_3(t)$ 再用显示器显示。图中，交流电桥就是一个调制电路， W_1 、 r 、 W_2 、 C 是交流电桥的平衡调节网络，移相器为相敏检波器提供同步检波的参考电压 $y(t)$ 。这也是实际应用中的动态应变仪原理。

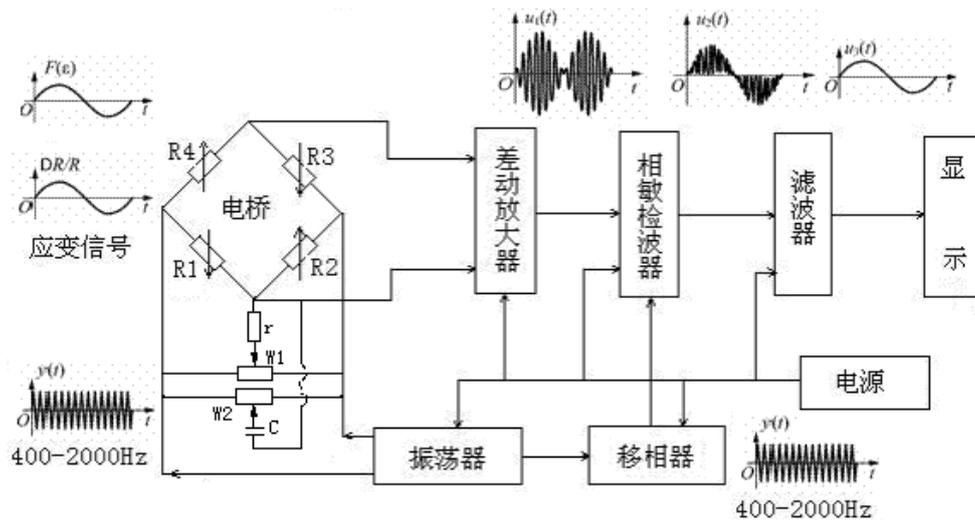


图 9—1 应变仪实验原理方块图

三、需用器件与单元：机头中的应变梁、激振器；显示面板中的音频振荡器、低频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的箔式应变、激振；调理电路面板中的电桥、差动放大器、移相器、相敏检波器、低通滤波器；双踪示波器（自备）。

四、实验步骤：

1、调整测微头远离应变梁的自由端，不能妨碍自由端的上下运动。将显示面板上的音频、低频振荡器幅度逆时针轻轻转到底（幅值输出最小），按图 9-2 接线。检查接线无误后，合上主、副电源开关。用示波器 [正确选择示波器的“触发”方式及其它 (TIME/DIV：在 0.5mS~0.1mS 范围内选择；VOLTS/DIV：2V~5V 范围内选择) 设置。所例设置仅供难考，具体要根据实际的示波器结合被测信号选择合适的功能档位设置。] 监测音频振荡器 L_v 的频率和幅值，调节音频振荡器的频率使 L_v 输出 1KHz 左右，幅度（峰峰值）调节到 10V_{p-p} 的

供桥电压。

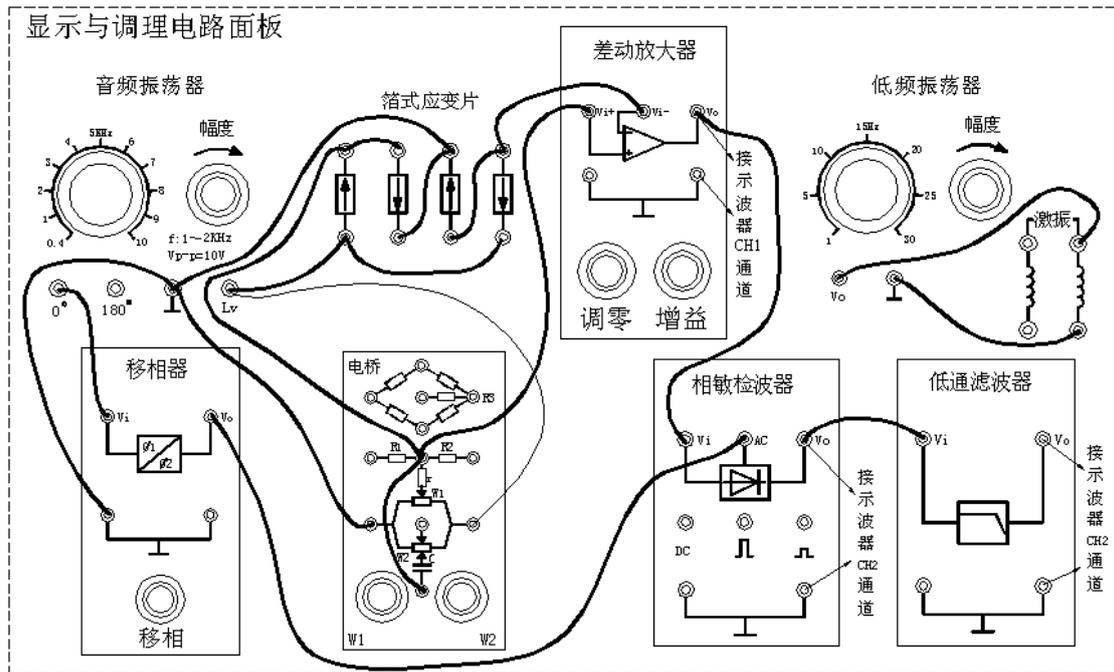


图 9—2 应变片振动测量实验接线图

2、调整好各环节、各单元电路，调整如下：（1）将差动放大器增益顺时针缓慢转到底（增益为 101 倍），再逆时针回转一点点（防电位器的可调触点在极限端点位置接触不良）。用示波器 [正确选择示波器的“触发”方式及其它 (TIME/DIV：在 0.5mS~0.1mS 范围内选择；VOLTS/DIV：0.2V~50mV 范围内选择) 设置] 观察相敏检波器输出，用手往下压住应变梁的自由端（应变梁的自由端向下产生较大位移）的同时调节移相器的移相电位器，使示波器显示的波形为一个全波整流波形（如相邻波形的谷底基准有高低可调节差动放大器的调零电位器）。（2）释放应变梁的自由端（自由端处于自然状态），再仔细调节电桥单元中的 W1 和 W2（交替调节），使示波器（相敏检波器输出）显示的波形幅值很小，接近为一水平线。

3、将低频振荡器的频率调到 8Hz~10Hz 左右，调节低频振荡器幅度旋钮，使应变梁的振动较为明显（如振动不明显再调节频率。注意事项：低频激振器幅值不要过大，以免应变梁的振幅过大而损坏应变片）。用示波器 [正确选择双线（双踪）示波器的“触发”方式及其它 (TIME/DIV：在 50mS~20mS 范围内选择；VOLTS/DIV：0.2V~50mV 范围内选择) 设置。设置仅供参考，具体要根据示波器与被测信号选择合适的功能档位设置。] 观察差动放大器（调幅波）、相敏检波器及低通滤波器（传感器信号）输出的波形。

4、分别调节低频振荡器的频率和幅度的同时观察低通滤波器输出波形的周期和幅值变化情况。实验完毕关闭主、副电源。

实验十 压阻式压力传感器的压力测量实验

一、实验目的：了解扩散硅压阻式压力传感器测量压力的原理和标定方法。

二、基本原理：扩散硅压阻式压力传感器的工作机理是半导体应变片的压阻效应，在半导体受力变形时会暂时改变晶体结构的对称性，因而改变了半导体的导电机理，使得它的电阻率发生变化，这种物理现象称之为半导体的压阻效应。一般半导体应变采用N型单晶硅为传感器的弹性元件，在它上面直接蒸镀扩散出多个半导体电阻应变薄膜（扩散出敏感栅）组成电桥。在压力（压强）作用下弹性元件产生应力，半导体电阻应变薄膜的电阻率产生很大变化，引起电阻的变化，经电桥转换成电压输出，则其输出电压的变化反映了所受到的压力变化。图 10—1 为压阻式压力传感器压力测量实验原理图。

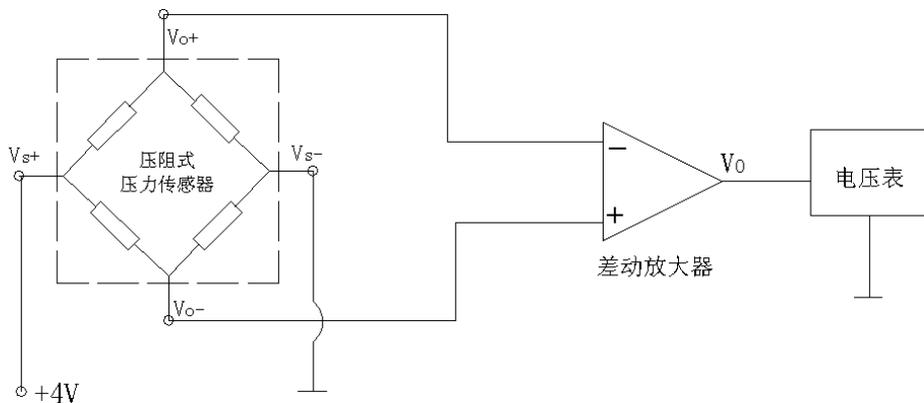


图 10—1 压阻式压力传感器压力测量实验原理

三、需用器件与单元：机头压力传感器；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板传感器输出单元中的压阻式压力传感器；调理电路单元中的差动放大器；铜三通引压胶管、手捏气泵、压力表。

四、实验步骤：

1、将机头上的压力传感器用铜三通引压胶管与压力表和手捏气泵连接好。如图 10—2 所示，并松开手捏气泵的单向阀。

2、在显示与调理电路面板上按图 10—3 接线（注意：压阻的电源端 V_s 与输出端 V_o 不能接错）。将 F/V 表(或电压表)量程切换开关切到 2V 档；可调直流稳压电源切到 4V 档。检查接线无误后合上主、副电源开关，将差动放大器的增益电位器按顺时针方向缓慢转到底后再逆向回转 1/3，调节调零电位器，使电压表显示电压为零。

3、锁紧手捏气泵的单向阀，仔细地反复手捏(注意：用力不要过大)气泵并同时观察压力表，压力上升到 4Kpa 左右时调节差动放大器的调零电位器，使电压表显示为相应的 0.4V 左右。再仔细地反复手捏气泵压力上升到 19Kpa 左右时调节差动放大器的增益电位器，使电压表相应显示 1.9V 左右。

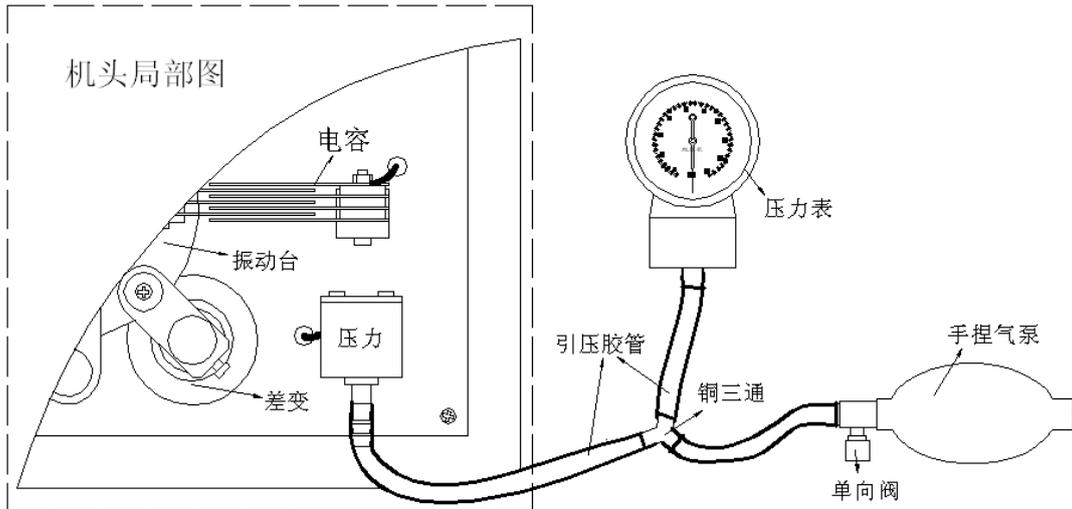


图 10—2 压阻式压力传感器测压实验连接图

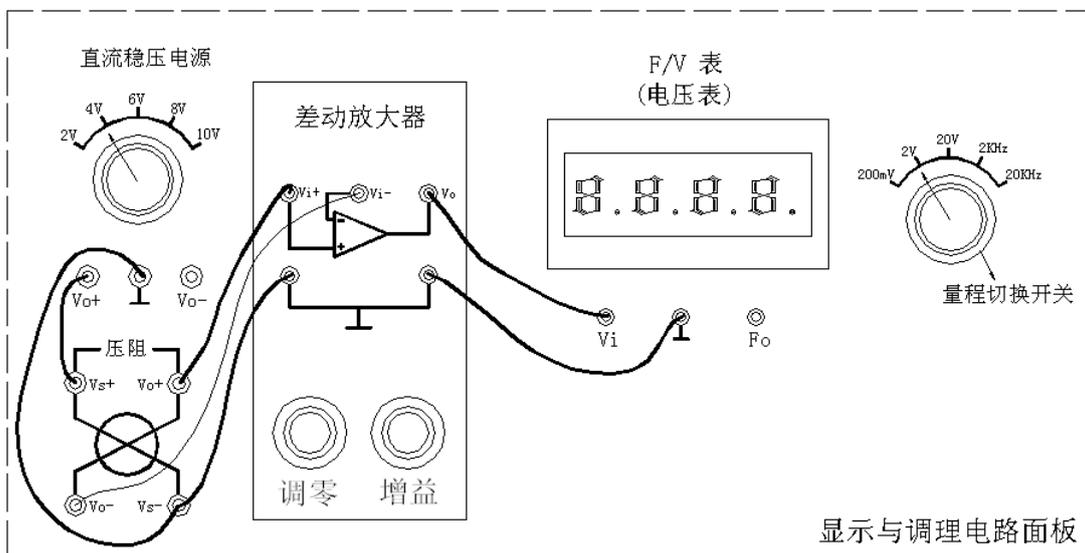


图 10—3 压阻式压力传感器测压实验接线图

4、仔细地慢悠悠松开手捏气泵的单向阀，使压力慢慢下降到 4Kpa 时锁紧气泵的单向阀，调节差动放大器的调零电位器，使电压表显示为相应的 0.400V。再仔细地反复手捏气泵压力上升到 19Kpa 时调节差动放大器的增益电位器，使电压表相应显示 1.900V。

5、重复步骤 4 过程，直到认为已足够精度时调节手捏气泵使压力在 3~19KPa 之间变化，每上升 1KPa 气压分别读取电压表读数，将数值列于表 10。

表 10 压阻式压力传感器测压实验数据：

P (KPa)										
Vo (p-p)										

6、画出实验曲线计算本系统的灵敏度和非线性误差。实验完毕，关闭所有电源。

实验十一 电容式传感器的位移实验

一、实验目的：了解电容式传感器结构及其特点。

二、基本原理：

1、原理简述：电容传感器是以各种类型的电容器为传感元件，将被测物理量转换成电容量的变化来实现测量的。电容传感器的输出是电容的变化量。利用电容 $C = \epsilon A / d$ 关系式通过相应的结构和测量电路可以选择 ϵ 、 A 、 d 中三个参数中，保持二个参数不变，而只改变其中一个参数，则可以有测干燥度（ ϵ 变）、测位移（ d 变）和测液位（ A 变）等多种电容传感器。电容传感器极板形状分成平板、圆板形和圆柱（圆筒）形，虽还有球形和锯齿形等其它的形状，但一般很少用。本实验采用的传感器为二组静态极片与一组动极片组成二个平板式变面积差动结构（二个平板式变面积电容变化量之差 $\Delta C = \Delta C_1 - \Delta C_2$ ）的电容位移传感器（具体平板式变面积电容传感器原理参阅教课书），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。

2、电容变换器原理图与调理电路中的电容变换器面板图：如图 11—1 所示。电容变换器的核心部分是图 11—2 的二极管环形充、放电电路。

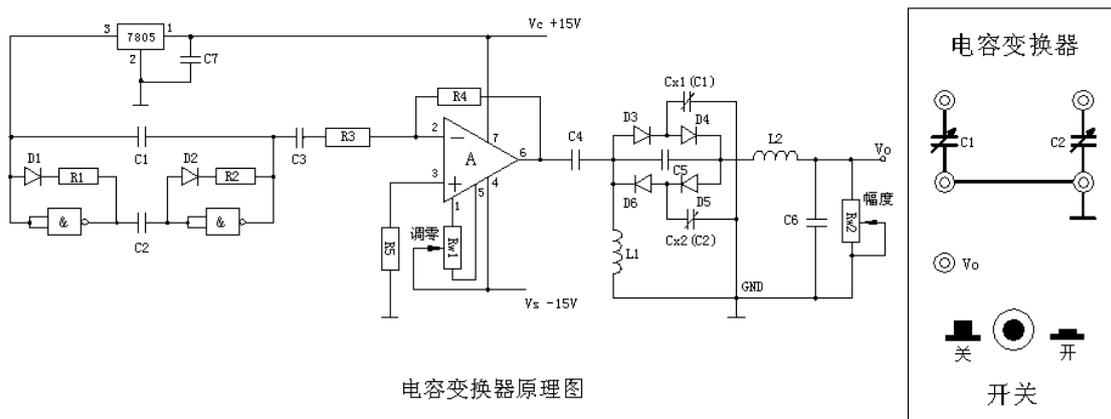


图 11—1 电容变换器原理图与面板图

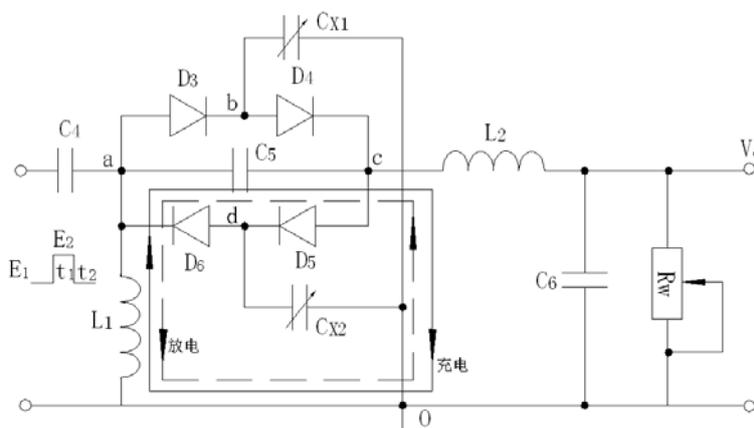


图 11—2 二极管环形充放电电路

在图 11—2 中，环形充放电电路由 D3、D4、D5、D6 二极管、C5 电容、L1 电感和 C_{X1}、C_{X2} 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_{X1} 和 C_{X2} 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_{X1} 充电到 0 点(地)；另一路由由 a 点经 C5 到 c 点，再经 D5 到 d 点对 C_{X2} 充电到 0 点。此时，D4 和 D6 由于反偏置而截止。在 t₁ 充电时间内，由 a 到 c 点的电荷量为：

$$Q_1 = C_{X2}(E_2 - E_1) \quad (11-1)$$

当高频激励电压由高电平 E₂ 返回到低电平 E₁ 时，电容 C_{X1} 和 C_{X2} 均放电。C_{X1} 经 b 点、D4、c 点、C5、a 点、L1 放电到 0 点；C_{X2} 经 d 点、D6、L1 放电到 0 点。在 t₂ 放电时间内由 c 点到 a 点的电荷量为：

$$Q_2 = C_{X1}(E_2 - E_1) \quad (11-2)$$

当然，(11—1) 式和 (11—2) 式是在 C5 电容值远远大于传感器的 C_{X1} 和 C_{X2} 电容值的前提下得到的结果。电容 C5 的充放电回路由图 11—3 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 $Q_2 = C_{X1}(E_2 - E_1)$ 点的电荷量为：

$$Q = Q_2 - Q_1 = (C_{X1} - C_{X2})(E_2 - E_1) = \Delta C_X \Delta E \quad (11-3)$$

式中：C_{X1} 与 C_{X2} 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：

$$i = fQ = f\Delta C_X \Delta E \quad (11-4)$$

式中：ΔE—激励电压幅值；ΔC_X—传感器的电容变化量。

由 (11—4) 式可看出：f、ΔE 一定时，输出平均电流 i 与 ΔC_X 成正比，此输出平均电流 i 经电路中的电感 L₂、电容 C₆ 滤波变为直流 I 输出，再经 R_w 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_{o1} 就可知 ΔX 位移。

3、电容式位移传感器实验原理方块图如图 11—3

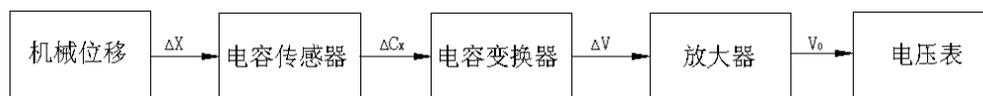


图 11—3 电容式位移传感器实验方块图

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、电容传感器；显示面板中的 F/V 表(或电压表)；调理电路面板传感器输出单元中的电容；调理电路单元中的电容变换器、电压放大器。

四、实验步骤:

1、按图 11—4 所示接线。调节测微头的微分筒使测微头的测杆端部与振动台吸合，再逆时针调节测微头的微分筒（振动台带动电容传感器的动片阻上升），直到电容传感器的动片组与静片组上沿基本平齐为止（测微头的读数大约为 20mm 左右）作为位移的起始点。

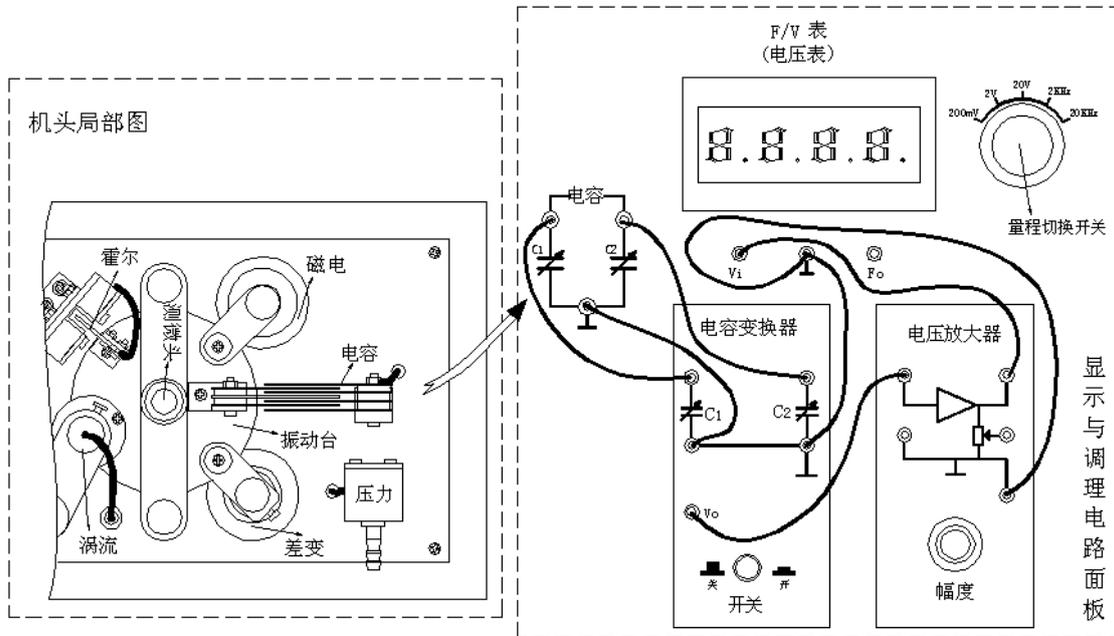


图 11—4 电容传感器位移测量系统接线示意图

2、将显示面板中的 F/V 表(或电压表) 的量程切换开关切换到 20V 档，再将电容变换器的按钮开关按一下（开）。检查接线无误后，合上主、副电源开关，读取电压表显示值为起始点的电压，填入下表 11 中。

3、仔细、缓慢地顺时针调节测微头的微分筒一圈 $\Delta X=0.5\text{mm}$ (不能转动过量，否则回转会引入机械回程差)从 F / V 表(或电压表)上读出相应的电压值，填入下表 11 中，以后，每调节测微头的微分筒一圈 $\Delta X=0.5\text{mm}$ 读出相应的输出电压直到电容传感器的动片组与静片组下沿基本平齐为止。

表 11 电容传感器测位移实验数据

X (mm)				
V (V)									

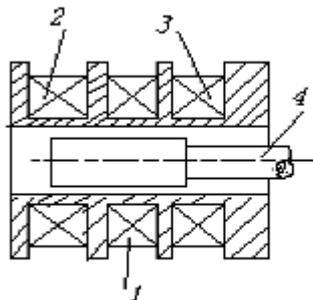
4、根据表 11 数据作出 $\Delta X-V$ 实验曲线，在实验曲线上截取线性比较好的线段作为测量范围并在测量范围内计算灵敏度 $S=\Delta V / \Delta X$ 与线性度。实验完毕，关闭所有电源开关。

实验十二 差动变压器的性能实验

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：差动变压器的工作原理类似变压器的作用原理。差动变压器的结构如图 12—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。由于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 12—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。对于差动变压器，当衔铁处于中间位置时，



1—一次绕组 2、3—二次绕组 4—衔铁

图 12—1 差动变压器的结构示意图

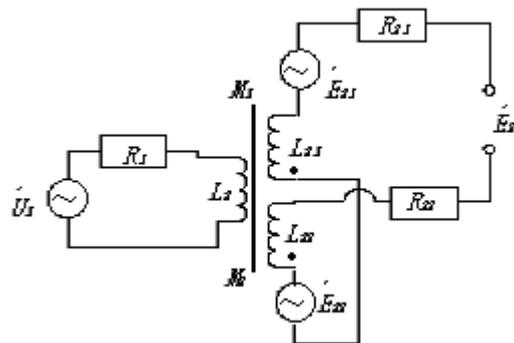


图 12—2 差动变压器的等效电路图

两个二次绕组互感相同，因而由一次侧激励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。当衔铁移向二次绕组 L_{21} ，这时互感 M_1 大， M_2 小，因而二次绕组 L_{21} 内感应电动势大于二次绕组 L_{22} 内感应电动势，这时差动输出电动势不为零。在传感器的量程内，衔铁位移越大，差动输出电动势就越大。同样道理，当衔铁向二次绕组 L_{22} 一边移动差动输出电动势仍不为零，但由于移动方向改变，所以输出电动势反相。因此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。

由图 12—2 可以看出一次绕组的电流为：
$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

二次绕组的感应电动势为：
$$\dot{E}_{21} = -j\omega M_1 \dot{I}_1 \quad \dot{E}_{22} = -j\omega M_2 \dot{I}_1$$

$$\dot{E}_2 = -j\omega(M_1 - M_2) \frac{U_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

由于二次绕组反向串接，所以输出总电动势为：

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 12—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。为了减小零点残余电动势可采取以下方法：

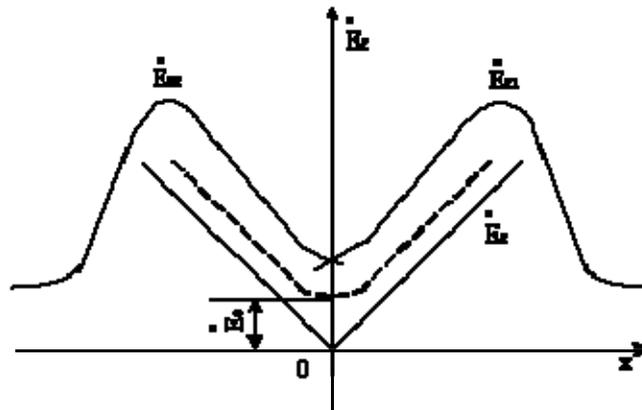


图 12—3 差动变压器输出特性

- 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 12—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 W_1 、 W_2 时，可使零点残余电动势减小。

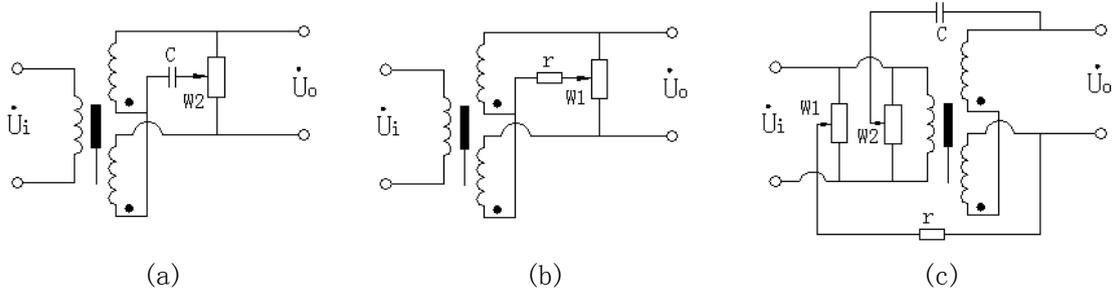


图 12—4 减小零点残余电动势电路

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、差动变压器；显示面板中音频振荡器；调理电路板传感器输出单元中的电感；双踪示波器(自备)。

四、实验步骤：

1、如下图 12—5， L_i 为初级线圈(一次线圈)； L_{o1} 、 L_{o2} 为次级线圈(二次线圈)；*号为同名端。差动变压器的原理图参阅图 12—2。

2、按图 12—5 示意接线，差动变压器的原边 L_i 的激励电压(绝对不能用直流电压激励)必须从显示面板中音频振荡器的 L_v 端子引入，检查接线无误后合上主电源开关，调节音频振荡器的频率为 3~5KHz[示波器监测、读数。正确选择双线(双踪)示波器的“触发”方式及其它设置]的某一值；调节输出幅度峰峰值为 $V_{p-p}=2V$ (示波器第一通道监测)。

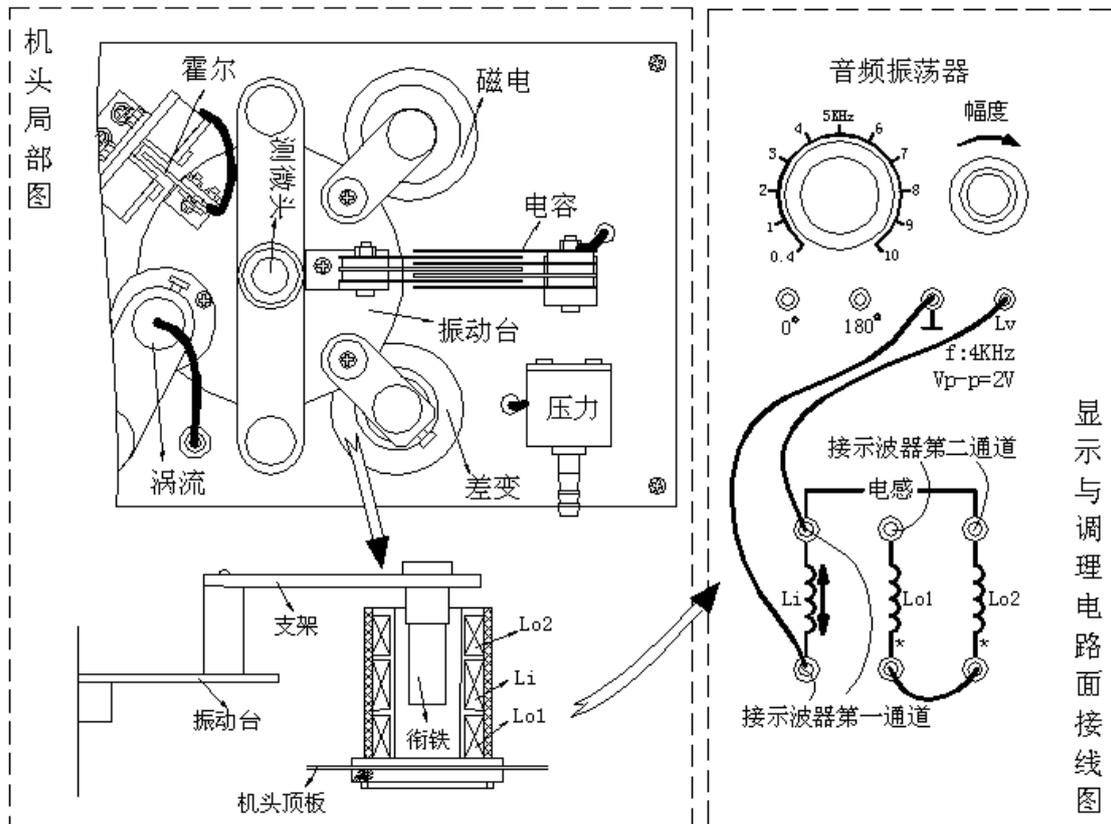


图 12—5 差动变压器性能实验安装、接线示意图

3、差动变压器的性能实验：使用测微头时，当来回调节微分筒使测杆产生位移的过程

中本身存在机械回程差，为消除这种机械回差可采用仔细、缓慢地单向调节位移方法并且不要调节过量。

a、逆时针方向（往上）调节测微头的微分筒(0.01mm/每小格)，使微分筒的0刻度线对准轴套的20mm刻度线，记录此时示波器[正确选择双线（双踪）示波器的“触发”方式及其它设置]第二通道显示的波形 V_{p-p} (峰峰值)值为实验起点值并填写在表12中。

b、顺时针方向（往下）每隔 $\Delta X=0.2\text{mm}$ 调节测微头的微分筒并从示波器上读出相应的电压 V_{p-p} 值(可取80个点值，当示波器显示的波形过“零”反相时作为“负”值)，填入下表12中(这样单行程位移方向做实验可以消除测微头的机械回差)。

表12 差动变压器性能实验数据

$\Delta X(\text{mm})$										
$V_{p-p}(\text{mV})$										

4、根据表12数据作出 $X-V_{p-p}$ 实验曲线并回答差动变压器的零点残余电压大小？实验完毕，关闭电源。

五、思考题：

- 1、试分析差动变压器与一般电源变压器的异同？
- 2、用直流电压激励会损坏传感器。为什么？
- 3、差动变压器为何存在零点残余电压？用什么方法可以减小零点残余电压？

实验十三 激励频率对差动变压器特性的影响

一、实验目的：了解初级线圈激励频率对差动变压器输出性能的影响。

二、基本原理：差动变压器的输出电压的有效值可以近似用关系式：
$$U_o = \frac{\omega(M_1 - M_2)U_i}{\sqrt{R_p^2 + \omega^2 L_p^2}}$$

表示，式中 L_p 、 R_p 为初级线圈电感和损耗电阻， U_i 、 ω 为激励电压和频率， M_1 、 M_2 为初级与两次级间互感系数，由关系式可以看出，当初级线圈激励频率太低时，若 $R_p^2 > \omega^2 L_p^2$ ，则输出电压 U_o 受频率变动影响较大，且灵敏度较低，只有当 $\omega^2 L_p^2 \gg R_p^2$ 时输出 U_o 与 ω 无关，当然 ω 过高会使线圈寄生电容增大，对性能稳定不利。

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、差动变压器；显示面板中音频振荡器；调理电路板传感器输出单元中的电感；双踪示波器(自备)。

四、实验步骤：

1、接线按实验十二、图 12—5。

2、检查接线无误后，合上主电源开关，调节音频振荡器 L_v 输出频率为 1KHz（用示波器监测频率）， $V_{p-p} = 2V$ （示波器监测）。调节测微头使差动变压器衔铁明显偏离位移中点（示波器监测 V_{p-p} 最小时）位置，即差动变压器有某个较大的 V_{p-p} 输出。

3、在保持位移量不变的情况下改变激励电压（音频振荡器）的频率从 1KHz—9KHz（激励电压幅值 2V 不变）时差动变压器的相应输出的 V_{p-p} 值填入表 13。

表 13 差动变压器幅频特性实验数据

F (Hz)	1KHz	2 KHz	3 KHz	4 KHz	5 KHz	6 KHz	7 KHz	8 KHz	9 KHz
V_{p-p}									

4、根据表 13 数据作出幅频 ($F - V_{p-p}$) 特性曲线。实验完毕，关闭主电源。

实验十四 差动变压器零点残余电压补偿实验

一、实验目的：了解差动变压器零点残余电压概念及补偿方法。

二、基本原理：由于差动变压器次级二线圈的等效参数不对称，初级线圈的纵向排列的不均匀性，铁芯 B-H 特性的非线性等，造成铁芯(衔铁) 无论处于线圈的什么位置其输出电压并不为零，其最小输出值称为零点残余电压。在实验十二(差动变压器的性能实验)中已经得到了零点残余电压，用差动变压器测量位移应用时一般要对其零点残余电压进行补偿。补偿方法阅读实验十二(二、基本原理)，本实验采用(c)补偿线路减小零点残余电压。

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、差动变压器；显示面板中音频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的电感、调理电路面板中的电桥；双踪示波器(自备)。

四、实验步骤：

1、图 14 为差变残余电压补偿原理图实验接线示意图，按下图 14 示意接线。检查接线无误后，合上主电源开关。调节测微头使差变输出的幅值(示波器测试)为最小，再调节电桥单元中的 W1 与 W2 (二者反复交替调节)使差变输出的幅值(示波器测试)为更小。按实验十二(差动变压器的性能实验)3 的 a、b 步骤实验，作出 $X-V_{p-p}$ 实验曲线。

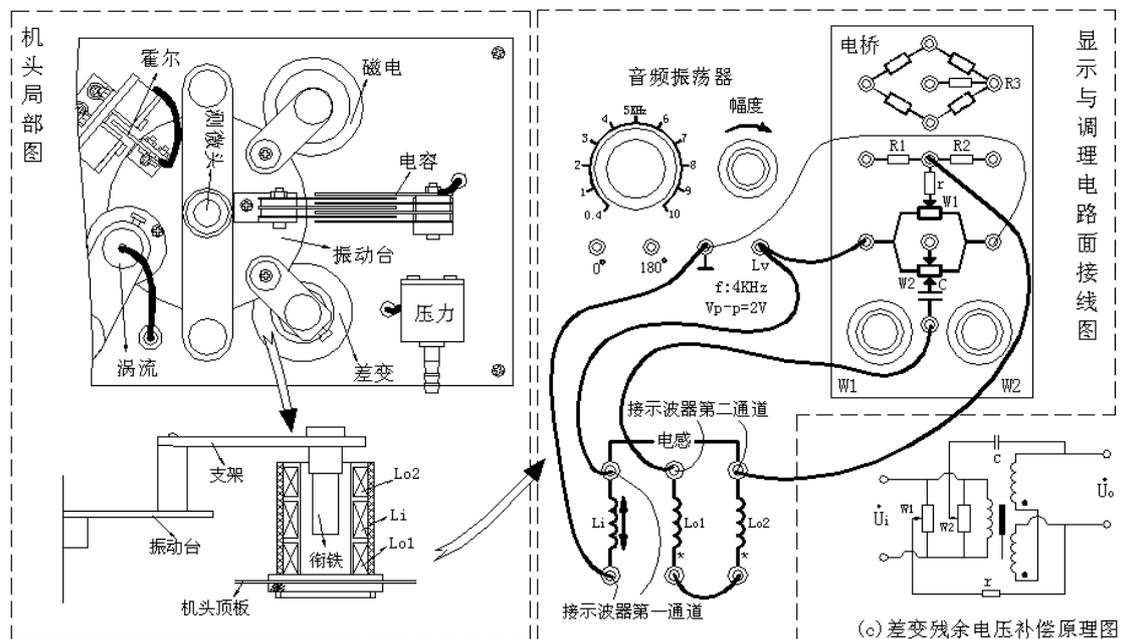


图 14 零点残余电压补偿实验接线示意图

2、比较二者(实验十二与实验十四)实验结果。实验完毕，关闭电源。

*说明：调理电路面板上的电桥单元是通用单元，不是差变补偿专用单元，因而补偿电路中的 r、c 元件参数值不是最佳设计值，会影响补偿效果。但学生只要通过实验理解补偿概念及方法就达到了目的。

实验十五 差动变压器测位移实验

一、实验目的：了解差动变压器测位移时的应用方法

二、基本原理：差动变压器的工作原理参阅实验十二（差动变压器性能实验）。差动变压器在应用时要想办法消除零点残余电动势和死区，选用合适的测量电路，如采用相敏检波电路，既可判别衔铁移动（位移）方向又可改善输出特性，消除测量范围内的死区。图 15—1 是差动变压器测位移原理框图。

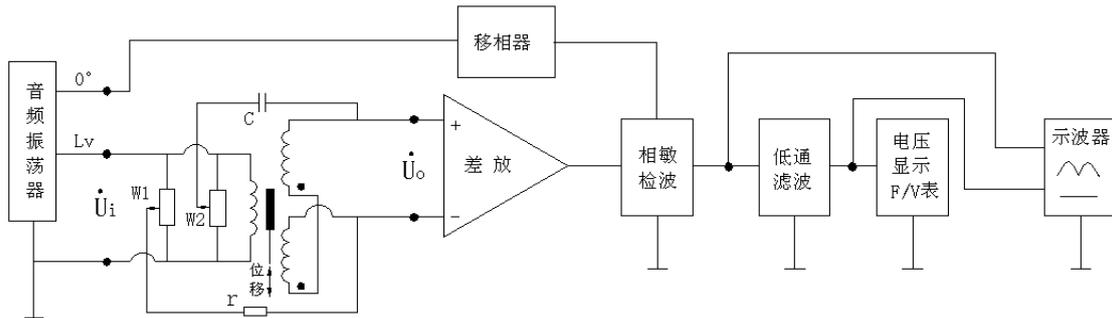


图 15—1 差动变压器测位移原理框图

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、差动变压器；显示面板中的 F / V 表（或电压表）、音频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的电感、调理电路面板中的电桥、差动放大器、移相器、相敏检波器、低通滤波器；双踪示波器(自备)。

四、实验步骤：

1、按图 15—2 示意接线。

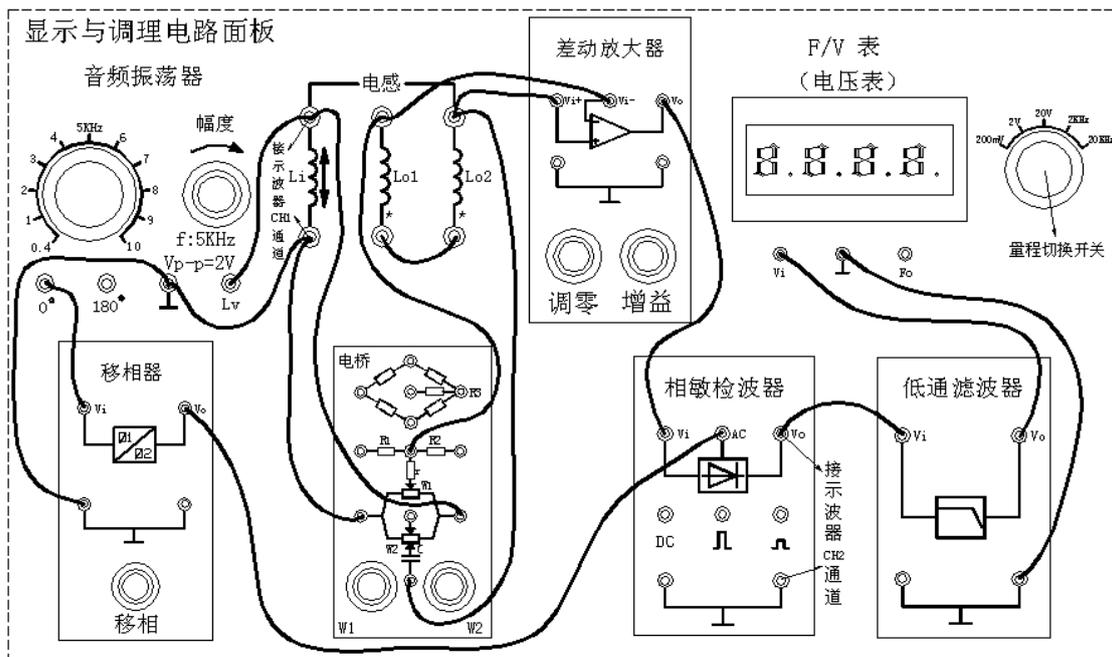


图 15—2 差动变压器测位移组成、接线示意图

2、将音频振荡器幅度调节到最小（幅度旋钮逆时针轻转到底）；电压表（F/V表）的量程切换开关切到2V档。检查接线无误后合上主、副电源开关。调节音频振荡器（用示波器监测），频率 $f=5\text{KHz}$ ，幅值 $V_{p-p}=2\text{V}$ 。

3、调整差动放大器增益：差动放大器增益旋钮顺时针缓慢转到底，再逆时针回转1/2。

4、调节测微头到15mm处，使差动变压器衔铁明显偏离位移中点位置后，调节移相器的移相旋钮使相敏检波器输出为全波整流波形（示波器监测），如相邻波形谷底不在同一水平线上，则调节差动放大器的调零旋钮使相邻波形谷底在同一水平线上。再仔细调节测微头，使相敏检波器输出波形幅值绝对值尽量为最小（衔铁处在初级线圈的中点位置）。

5、调节电桥单元中的W1、W2（二者交替配合反复调节）使相敏检波器输出波形趋于水平线（可相应调节示波器量程档观察）并且电压表显示趋于0（以电压表显示为主）。

7、调节测微头到20mm处并记录电压表读数作为位移始点，以后顺时针方向调节测微头每隔 $\Delta X=0.2\text{mm}$ 从电压表上读输出输出电压V值（20mm全行程范围），填入下表15。

表15 差动变压器测位移实验数据

X(mm)									
V(mV)									

8、根据表15的实验数据作出实验曲线（自设十字坐标）并在曲线上截取线性较好的曲线段作为位移测量范围（作为传感器的量程）计算灵敏度 $S=\Delta V / \Delta X$ 与线性度。实验完毕关闭所有电源开关。

五、思考题：

- 1、此差动变压器的量程多大？
- 2、差动变压器输出经相敏检波器检波后是否消除了零点残余电压和死区？
- 3、从实验曲线上能理解相敏检波器的鉴相特性吗？

实验十六 差动变压器的应用—振动测量实验

一、实验目的：了解差动变压器测量振动的办法。

二、基本原理：参阅实验十二、实验十五。当差动变压器的衔铁连接杆与被测体连接时就能检测到被测体的位移变化或振动。

三、需用器件与单元：机头中的振动台、差动变压器；显示面板中音频振荡器、低频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的电感、激振；调理电路面板中的电桥、差动放大器、移相器、相敏检波器、低通滤波器；双踪示波器(自备)。

四、实验步骤：

1、调节测微头远离振动台，不能妨碍振动台的上下运动。按图 16 示意接线。

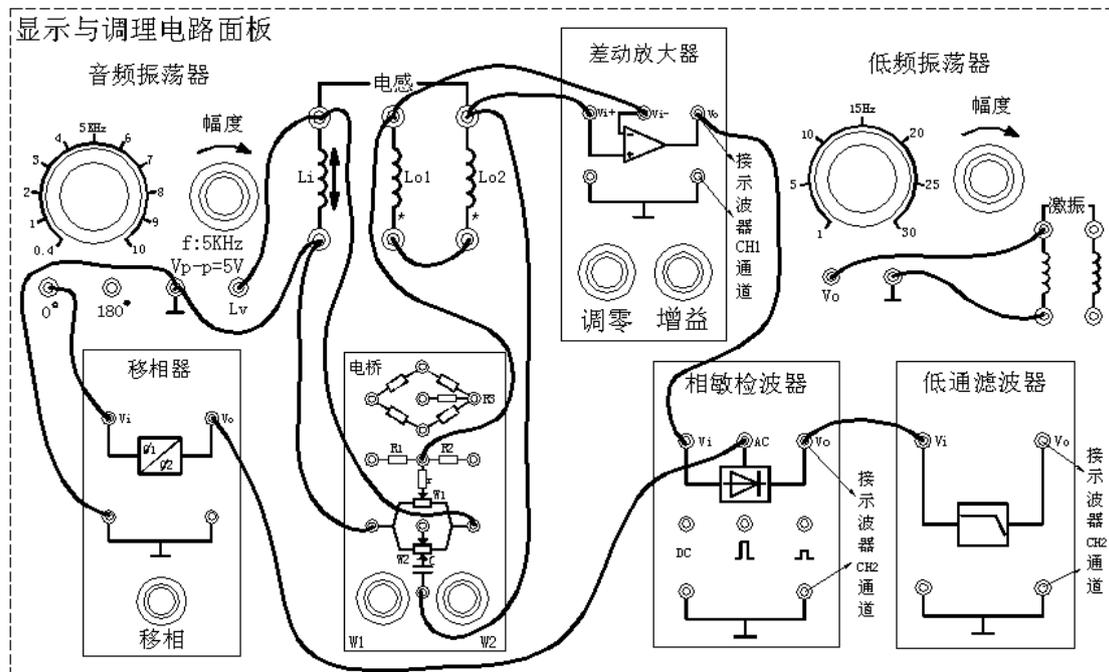


图 16 差动变压器振动测量接线示意图

2、将音频振荡器和低频振荡器的幅度电位器逆时针轻轻转到底（幅度最小），并调整好有关部分。调整如下：（1）检查接线无误后合上主、副电源开关。用示波器〔正确选择双线（双踪）示波器的“触发”方式及其它（TIME/DIV：在 0.5mS~0.1mS 范围内选择；VOLTS/DIV：1V~5V 范围内选择）设置〕监测音频振荡器 L_v 的频率和幅值，调节音频振荡器的频率、幅度旋钮使 L_v 输出 4~6KHz 左右、 $V_{p-p}=5V$ 的激励电压。（2）将差动放大器的增益电位器顺时针方向缓慢转到底，再逆时针回转 1/2。用示波器观察相敏检波器输出，再用手往下压住振台的同时调节移相器的移相电位器，使示波器显示的波形为一个全波整流波形（如相邻波形谷底不在同一水平线上，则调节差动放大器的调零旋钮使相邻波形谷底在同一水平线上）。（3）

释放振动台(振动台处于自然状态),再仔细调节电桥单元中的 W_1 和 W_2 (二者反复交替调节),使示波器(相敏检波器输出)显示的波形幅值很小,接近为一水平线。

3、将低频振荡器的频率调到 8Hz 左右,调节低频振荡器幅度旋钮,使振动台振动较为明显(如振动不明显再调节频率)。用示波器[正确选择双线(双踪)示波器的“触发”方式及其它(TIME/DIV:在 50mS~20mS 范围内选择;VOLTS/DIV:1V~0.1V 范围内选择)设置]观察差动放大器(调幅波)、相敏检波器及低通滤波器(传感器信号)输出的波形。

4、分别调节低频振荡器的频率和幅度的同时观察低通滤波器(传感器信号)输出波形的周期和幅值。

5、作出差动放大器、相敏检波器、低通滤波器的输出波形。实验完毕,关闭电源。

实验十七 电涡流传感器位移特性实验

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:电涡流式传感器是一种建立在涡流效应原理上的传感器。电涡流式传感器由传感器线圈和被测物体(导体—金属涡流片)组成,如图 17.1.1 所示。根据电磁感应原理,当传感器线圈(一个扁平线圈)通以交变电流(频率较高,一般为 1MHz~2MHz) I_1 时,线圈周围空间会产生交变磁场 H_1 ,当线圈平面靠近某一导体面时,由于线圈磁通链穿过导体,使导体的表面层感应出呈旋涡状自行闭合的电流 I_2 ,而 I_2 所形成的磁通链又穿过传感器线圈,这样线圈与涡流“线圈”形成了有一定耦合的互感,最终原线圈反馈一等效电感,从而导致传感器线圈的阻抗 Z 发生变化。我们可以把被测导体上形成的电涡等效成一个短路环,这样就得到如图 17.1.2 的等效电路。图中 R_1 、 L_1 为传感器线

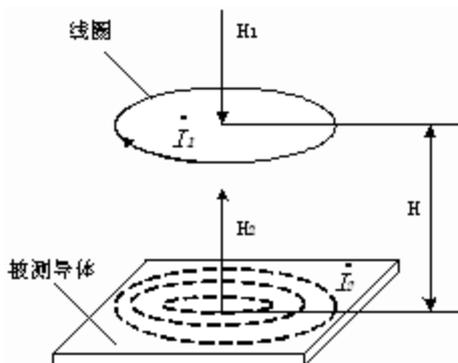


图 17.1.1 电涡流传感器原理图

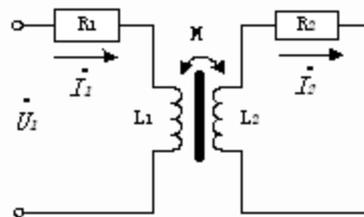


图 17.1.2 电涡流传感器等效电路图

圈的电阻和电感。短路环可以认为是一匝短路线圈,其电阻为 R_2 、电感为 L_2 。线圈与导体间

存在一个互感M，它随线圈与导体间距的减小而增大。

根据等效电路可列出电路方程组：

$$\begin{cases} R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \\ R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \end{cases}$$

通过解方程组，可得 I_1 、 I_2 。因此传感器线圈的复阻抗为：

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \right] + j \left[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right]$$

线圈的等效电感为：

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$$

线圈的等效Q值为：

$$Q = Q_0 \left\{ [1 - (L_2 \omega^2 M^2) / (L_1 Z_2^2)] / [1 + (R_2 \omega^2 M^2) / (R_1 Z_2^2)] \right\}$$

式中： Q_0 ——无涡流影响下线圈的Q值， $Q_0 = \omega L_1 / R_1$ ；

Z_2^2 ——金属导体中产生电涡流部分的阻抗， $Z_2^2 = R_2^2 + \omega^2 L_2^2$ 。

由式Z、L和式Q可以看出，线圈与金属导体系统的阻抗Z、电感L和品质因数Q值都是该系统互感系数平方的函数，而从麦克斯韦互感系数的基本公式出发，可得互感系数是线圈与金属导体间距离 $x(H)$ 的非线性函数。因此Z、L、Q均是 x 的非线性函数。虽然它整个函数是一非线性的，其函数特征为“S”型曲线，但可以选取它近似为线性的一段。其实Z、L、Q的变化与导体的电导率、磁导率、几何形状、线圈的几何参数、激励电流频率以及线圈到被测导体间的距离有关。如果控制上述参数中的一个参数改变，而其余参数不变，则阻抗就成为这个变化参数的单值函数。当电涡流线圈、金属涡流片以及激励源确定后，并保持环境温度不变，则只与距离 x 有关。于此，通过传感器的调理电路（前置器）处理，将线圈阻抗Z、L、Q的变化转化成电压或电流的变化输出。输出信号的大小随探头到被测体表面之间的间距而变化，电涡流传感器就是根据这一原理实现对金属物体的位移、振动等参数的测量。

为实现电涡流位移测量，必须有一个专用的测量电路。这一测量电路（称之为前置器，也称电涡流变换器）应包括具有一定频率的稳定的震荡器和一个检波电路等。电涡流传感器位移测量实验框图如图17—2所示：

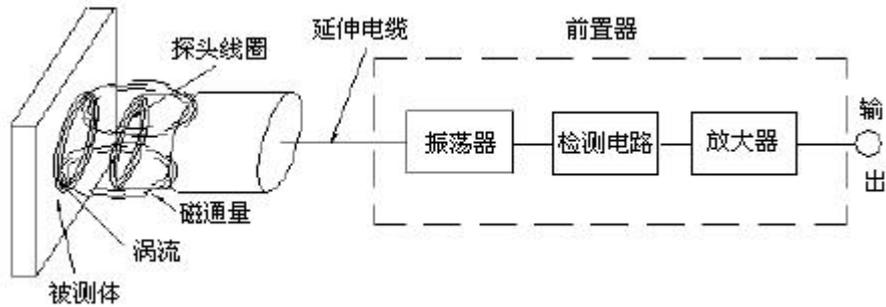
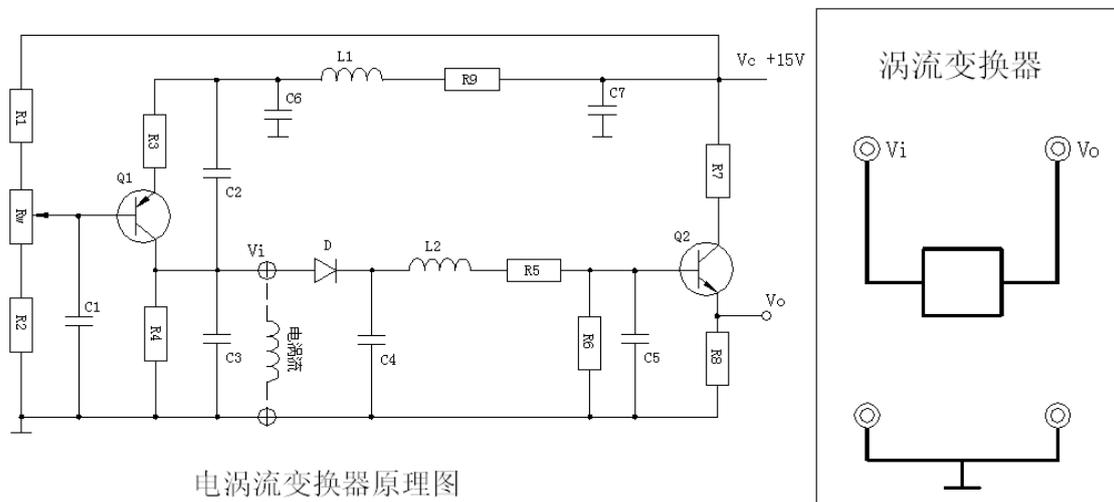


图 17—2 电涡流位移特性实验原理框图

根据电涡流传感器的基本原理，将传感器与被测体间的距离变换为传感器的 Q 值、等效阻抗 Z 和等效电感 L 三个参数，用相应的测量电路（前置器）来测量。

本实验的涡流变换器为变频调幅式测量电路，电路原理与面板如图 17—3 所示。



电涡流变换器原理图

图 17—3 电涡流变换器原理图与面板图

电路组成：(1) $Q1$ 、 $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 组成电容三点式振荡器，产生频率为 1MHz 左右的正弦载波信号。电涡流传感器接在振荡回路中，传感器线圈是振荡回路的一个电感元件。振荡器作用是将位移变化引起的振荡回路的 Q 值变化转换成高频载波信号的幅值变化。(2) $D1$ 、 $C5$ 、 $L2$ 、 $C6$ 组成了由二极管和 LC 形成的 π 形滤波的检波器。检波器的作用是将高频调幅信号中传感器检测到的低频信号取出来。(3) $Q2$ 组成射极跟随器。射极跟随器的作用是输入、输出匹配以获得尽可能大的不失真输出的幅度值。

电涡流传感器是通过传感器端部线圈与被测物体（导体）间的间隙变化来测物体的振动相对位移量和静位移的，它与被测物之间没有直接的机械接触，具有很宽的使用频率范围（从 $0\sim 10\text{Hz}$ ）。当无被测导体时，振荡器回路谐振于 f_0 ，传感器端部线圈 Q_0 为定值且最高，对应的检波输出电压 V_0 最大。当被测导体接近传感器线圈时，线圈 Q 值发生变，振荡器的谐振频率发生变化，谐振曲线变得平坦，检波出的幅值 V_0 变小。 V_0 变化反映了位移 x 的变

化。电涡流传感器在位移、振动、转速、探伤、厚度测量上得到应用。

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、电涡流传感器、被测体(铁圆片)；显示面板中的 F / V 表 (或电压表)；调理电路面板传感器输出单元中的电涡流、调理电路面板中的涡流变换器；示波器 (自备)。

四、实验步骤：

1、调节测微头初始位置的刻度值为 5mm 处，松开电涡流传感器的安装轴套紧固螺钉，调整电涡流传感器高度与电涡流检测片相帖时拧紧轴套紧固螺钉并按图 17—4 示意接线。

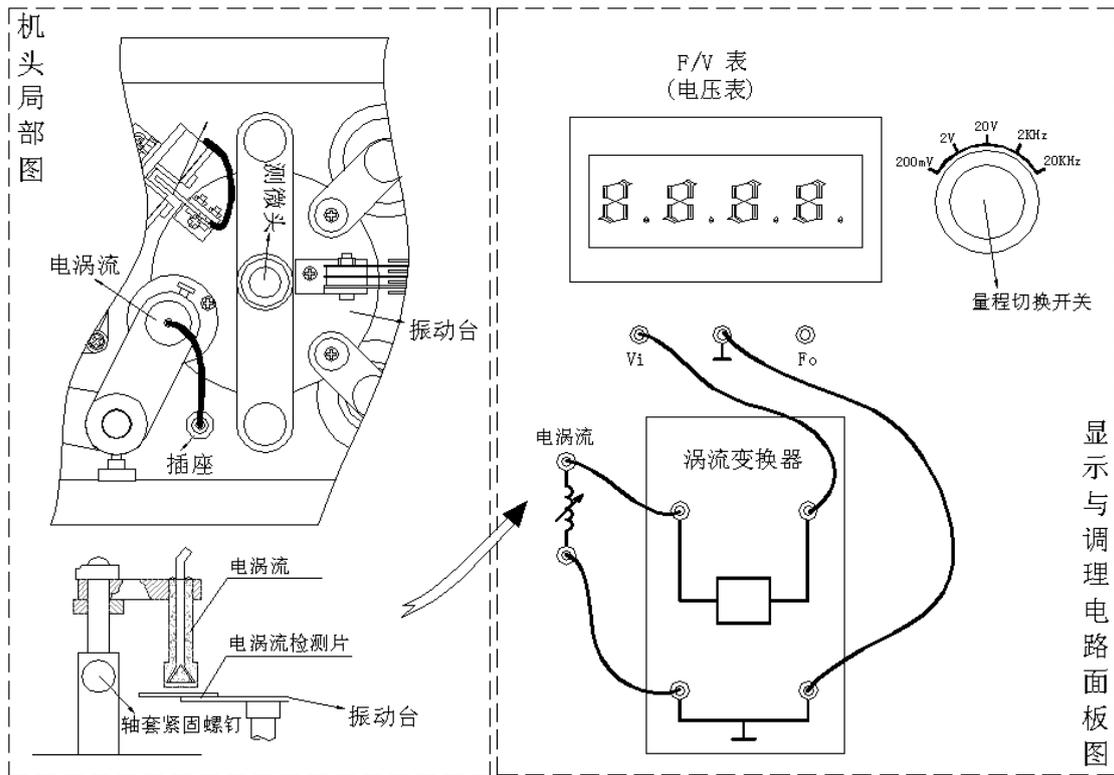


图 17—4 电涡流传感器位移特性实验接线示意图

2、将电压表 (F / V 表) 量程切换开关切换到 20V 档，检查接线无误后合上主、副电源开关 (在涡流变换器输入端可接示波器观测振荡波形)，记下电压表读数，然后逆时针调节测微头微分筒每隔 0.1mm 读一个数，直到输出 V_o 变化很小为止并将数据列入表 17。

表 17 电涡流传感器位移 X 与输出电压数据

X (mm)									
V_o (V)										

3、根据表 17 数据作出 $V-X$ 实验曲线。在实验曲线上截取线性较好的区域作为传感器的位移量程计算灵敏度和线性度 (可用最小二乘法或其它拟合直线)。实验完毕，关闭所有电源。

实验十八 被测体材质对电涡流传感器特性影响

一、实验目的：了解不同的被测体材料对电涡流传感器性能的影响。

二、基本原理：电涡流传感器在被测体上产生的涡流效应与被测导体本身的电阻率和磁导率有关，因此不同的材料就会有不同的性能。基本原理参阅实验十七。

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、电涡流传感器、被测体(铝圆片)；显示面板中的 F / V 表 (或电压表)；调理电路面板传感器输出单元中的电涡流、调理电路面板中的涡流变换器。

四、实验步骤：

1、将被测体铁圆片换成铝圆片，实验方法与步骤同实验十七。

2、按实验十七实验，将数据列入表 18-1、18-2。

表 18-1 被测体为铁圆片时的位移为输出电压数据

X (mm)										
V _o (V)										

表 18-2 被测体为铝圆片时的位移与输出电压数据

X (mm)										
V _o (V)										

3、根据上表的实验数据，在同一坐标上画出实验曲线进行比较，分别计算灵敏度和线性度。实验完毕，关闭电源。

实验十九 电涡流传感器测振动实验

- 一、实验目的：了解电涡流传感器测振动的原理与方法。
- 二、基本原理：根据电涡流传感器位移特性，根据被测材料选择合适的工作点即可测量振动。
- 三、需用器件与单元：机头中的振动台、电涡流传感器、被测体(铁圆片)；显示面板中的 F/V 表（或电压表）、低频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的电涡流、激振；调理电路面板中的涡流变换器；示波器(自备)。
- 四、实验步骤：

1、调节测微头远离振动台，不能妨碍振动台的上下运动。按图 19 示意接线。

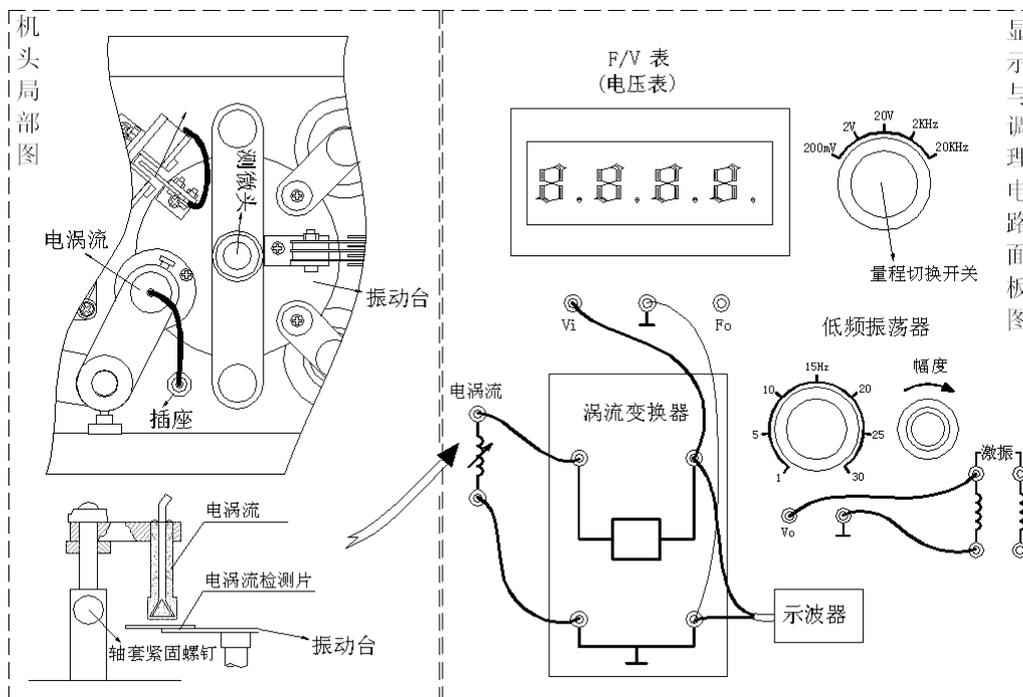


图 19 电涡流传感器测振动安装、接线示意图

2、将低频振荡器幅度旋钮逆时针转到底(低频输出幅度最小)；电压表的量程切到 20V 档。检查接线无误后合上主、副电源开关，松开电涡流传感器的安装轴套紧固螺钉，调整电涡流传感器与电涡流检测片的间隙，使电压表显示为 2.5V 左右时拧紧轴套紧固螺钉（传感器与被测体铁圆片静态时的最佳距离为线性区域中点）。

3、调节低频振荡器的频率为 8Hz 左右，再调节低频振荡器幅度使振动台起振，振动幅度不能过大（电涡流传感器测小位移，否则超线性区域）。用示波器监测涡流变换器的输出波形；再分别改变低频振荡器的振荡频率、幅度，分别观察、体会涡流变换器输出波形的变化。实验完毕，关闭所有电源。

实验二十 压电式传感器测振动实验

一、实验目的：了解压电传感器的原理和测量振动的方法。

二、基本原理：压电式传感器是一和典型的发电型传感器，其传感元件是压电材料，它以压电材料的压电效应为转换机理实现力到电量的转换。压电式传感器可以对各种动态力、机械冲击和振动进行测量，在声学、医学、力学、导航方面都得到广泛的应用。

1、压电效应：

具有压电效应的材料称为压电材料，常见的压电材料有两类压电单晶体，如石英、酒石酸铀钾等；人工多晶体压电陶瓷，如钛酸钡、锆钛酸铅等。

压电材料受到外力作用时，在发生变形的同时内部产生极化现象，它表面会产生符号相反的电荷。当外力去掉时，又重新回复到原不带电状态，当作用力的方向改变后电荷的极性也随之改变，如图 20—1 (a)、(b)、(c)所示。这种现象称为压电效应。

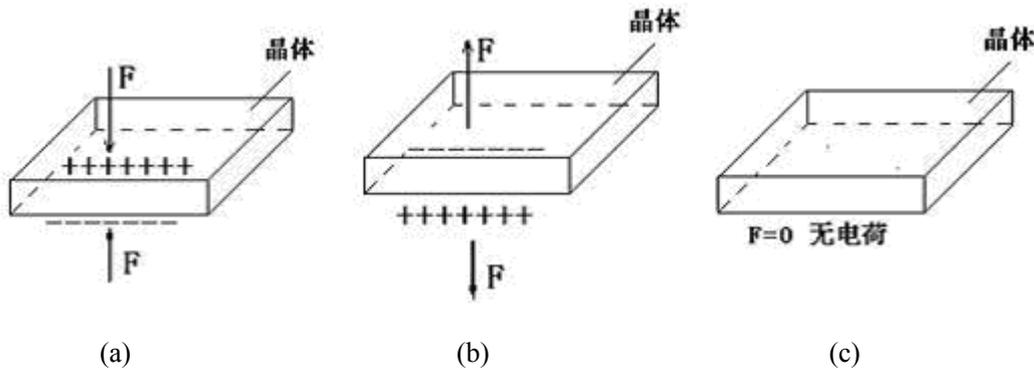


图 20—1 压电效应

2、压电晶片及其等效电路

多晶体压电陶瓷的灵敏度比压电单晶体要高很多，压电传感器的压电元件是在两个工作面上蒸镀有金属膜的压电晶片，金属膜构成两个电极，如图 20—2(a)所示。当压电晶片受到力的作用时，便有电荷聚集在两极上，一面为正电荷，一面为等量的负电荷。这种情况和电容器十分相似，所不同的是晶片表面上的电荷会随着时间的推移逐渐漏掉，因为压电晶片材料的绝缘电阻(也称漏电阻)虽然很大，但毕竟不是无穷大，从信号变换角度来看，压电元件相当于一个电荷发生器。从结构上看，它又是一个电容器。因此通常将压电元件等效为一个电荷源与电容相并联的电路如 20—2(b)所示。其中 $e_a = Q/C_a$ 。式中， e_a 为压电晶片受力后所呈现的电压，也称为极板上的开路电压； Q 为压电晶片表面上的电荷； C_a 为压电晶片的电容。

实际的压电传感器中，往往用两片或两片以上的压电晶片进行并联或串联。压电晶片并联时如图 20—2(c)所示，两晶片正极集中在中间极板上，负电极在两侧的电极上，因而电容量大，输出电荷量大，时间常数大，宜于测量缓变信号并以电荷量作为输出。

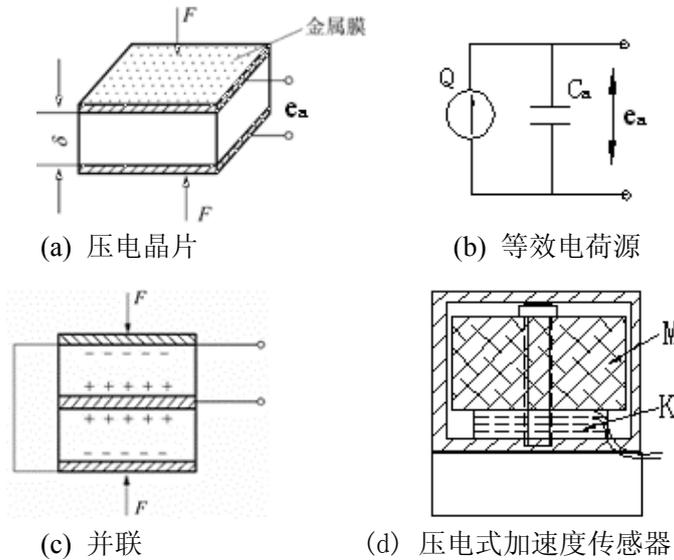


图 20—2 压电晶片及等效电路

压电传感器的输出，理论上应当是压电晶片表面上的电荷 Q 。根据图 20—2(b)可知测试中也可取等效电容 C_a 上的电压值，作为压电传感器的输出。因此，压电式传感器就有电荷和电压两种输出形式。

3、压电式加速度传感器

图 20—2(d) 是压电式加速度传感器的结构图。图中， M 是惯性质量块， K 是压电晶片。压电式加速度传感器实质上是一个惯性力传感器。在压电晶片 K 上，放有质量块 M 。当壳体随被测振动体一起振动时，作用在压电晶体上的力 $F=Ma$ 。当质量 M 一定时，压电晶体上产生的电荷与加速度 a 成正比。

4、压电式加速度传感器和放大器等效电路

压电传感器的输出信号很弱小，必须进行放大，压电传感器所配接的放大器有两种结构形式：一种是带电阻反馈的电压放大器，其输出电压与输入电压(即传感器的输出电压)成正比；另一种是带电容反馈的电荷放大器，其输出电压与输入电荷量成正比。

电压放大器测量系统的输出电压对电缆电容 C_c 敏感。当电缆长度变化时， C_c 就变化，使得放大器输入电压 e_i 变化，系统的电压灵敏度也将发生变化，这就增加了测量的困难。电荷放大器则克服了上述电压放大器的缺点。它是一个高增益带电容反馈的运算放大器。当略

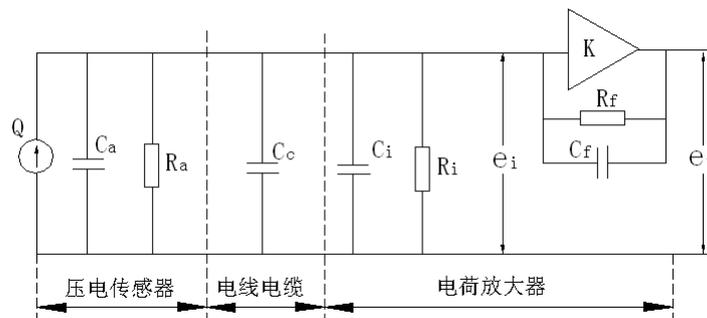


图 20—3 是传感器-电缆-电荷放大器系统的等效电路图。

去传感器的漏电阻 R_a 和电荷放大器的输入电阻 R_i 影响时，有

$$Q = e_i(C_a + C_c + C_i) + (e_i - e_y)C_f \dots\dots (20-1)。$$

式中， e_i 为放大器输入端电压； e_y 为放大器输出端电压 $e_y = -Ke_i$ ； K 为电荷放大器开环放大倍数； C_f 为电荷放大器反馈电容。将 $e_y = -Ke_i$ 代入式(20—1)，可得到放大器输出端电压 e_y 与传感器电荷 Q 的关系式：设 $C = C_a + C_c + C_i$

$$e_y = -KQ / [(C + C_f) + KC_f] \dots\dots (20-2)$$

当放大器的开环增益足够大时，则有 $KC_f \gg C + C_f$ (20—2) 简化为

$$e_y = -Q / C_f \dots\dots (20-3)$$

式(21—3)表明，在一定条件下，电荷放大器的输出电压与传感器的电荷量成正比，而与电缆的分布电容无关，输出灵敏度取决于反馈电容 C_f 。所以，电荷放大器的灵敏度调节，都是采用切换运算放大器反馈电容 C_f 的办法。采用电荷放大器时，即使连接电缆长度达百米以上，其灵敏度也无明显变化，这是电荷放大器的主要优点。

5、压电加速度传感器实验原理图

压电加速度传感器实验原理、电荷放大器与实验面板图由图 20—4(a)、(b)所示。

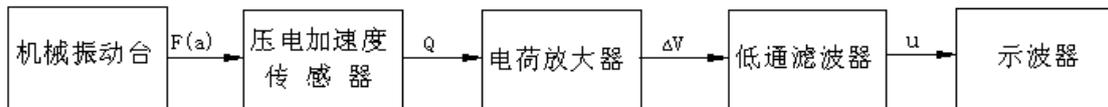


图 20—4(a) 压电加速度传感器实验原理框图

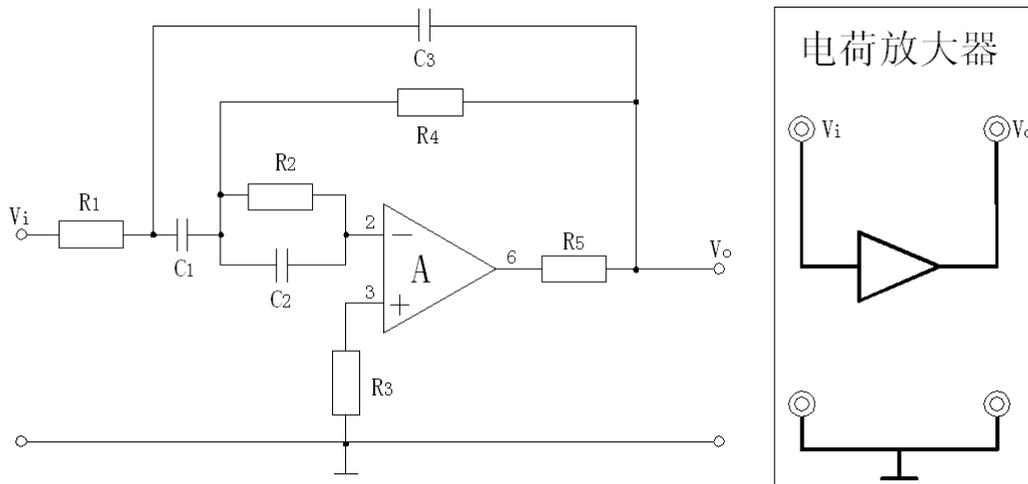


图 20—4(b) 电荷放大器原理图与实验面板图

三、需用器件与单元：机头中的悬臂双平行梁、激振器、压电传感器；显示面板中的低频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的压电、激振；调理电路面板中的电荷放大器、低通滤波器；双踪示波器（自备）。

四、实验步骤:

1、按图 20—5 示意接线。

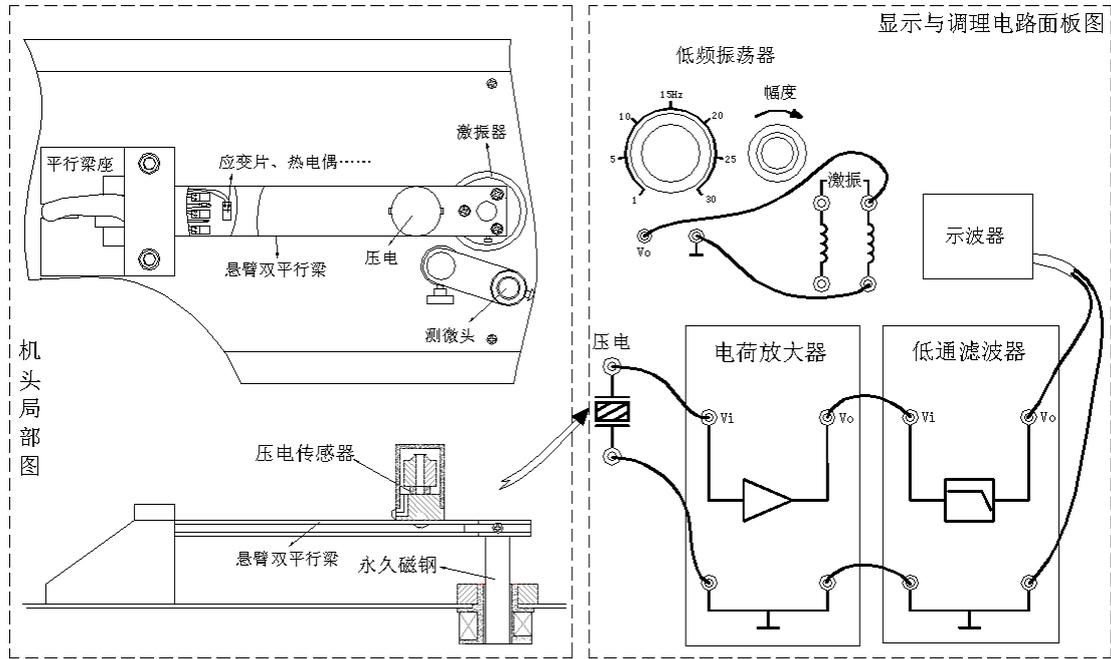


图 20—5 压电传感器测振动实验接线示意图

2、将显示面板中的低频振荡器幅度旋钮逆时针缓慢转到底(低频输出幅度最小)，调节低频振荡器的频率在 8Hz~10Hz 左右。检查接线无误后合上主、副电源开关。再调节低频振荡器的幅度使振动台明显振动(如振动不明显可调频率)。

3、用示波器的两个通道[正确选择双线(双踪)示波器的“触发”方式及其它(TIME/DIV：在 50mS~20mS 范围内选择；VOLTS/DIV：1V~0.1V 范围内选择)设置]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、改变低频振荡器的频率，观察输出波形变化。实验完毕，关闭所有电源开关。

实验二十一 热电偶的原理及现象实验

一、实验目的：了解热电偶测温原理。

二、基本原理：1821年德国物理学家赛贝克（T.J. Seebeck）发现和证明了两种不同材料的导体A和B组成的闭合回路，当两个结点温度不不同时，回路中将产生电动势。这种物理现象称为热电效应（塞贝克效应）。

热电偶测温原理是利用热电效应。如图21—1所示，热电偶就是将A和B二种不同金属材料的一端焊接而成。A和B称为热电极，焊接的一端是接触热场的T端称为工作端或测量端，也称热端；未焊接的一端处在温度 T_0 称为自由端或参考端，也称冷端（接引线用来连接测量仪表的

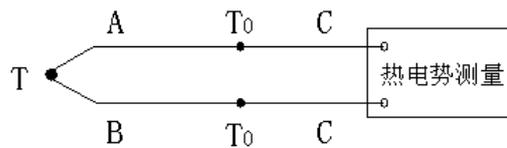


图 21—1 热电偶

两根导线C是同样的材料，可以与A和B不同种材料)。T与 T_0 的温差愈大，热电偶的输出电动势愈大；温差为0时，热电偶的输出电动势为0；因此，可以用测热电动势大小衡量温度的大小。国际上，将热电偶的A、B热电极材料不同分成若干分度号，并且有相应的分度表即参考端温度为 0°C 时的测量端温度与热电动势的对应关系表；可以通过测量热电偶输出的热电动势值再查分度表得到相应的温度值。热电偶一般用来测量较高的温度，应用在冶金、化工和炼油行业，用于测量、控制较高的温度。

本实验只是定性了解热电偶的热电势现象，实验仪所配的热电偶是由铜—康铜组成的简易热电偶，分度号为T。实验仪有二个热电偶，它们封装在悬臂双平行梁上、下梁的上、下表面中，二个热电偶串联在一起，产生热电势为二者之和。

三、需用器件与单元：机头平行梁中的热电偶、加热器；显示面板中的F/V表（或电压表）、-15V电源；调理电路面板中传感器输出单元中的热电偶、加热器；调理电路单元中的差动放大器；室温温度计（自备）。

四、实验步骤：

1、热电偶无温差时差动放大器调零：将电压表量程切换到2V档，按图21—2示意接线，检查接线无误后合上主、副电源开关。将差动放大器的增益电位器顺时针方向缓慢转到底（增益为101倍），再逆时针回转一点点（防电位器的可调触点在极限端点位置接触不良）；再调节差动放大器的调零旋钮，使电压表显示0V左右，再将电压表量程切换到200mV档继续调零，使电压表显示0V。并记录下自备温度计所测的室温 t_n 。

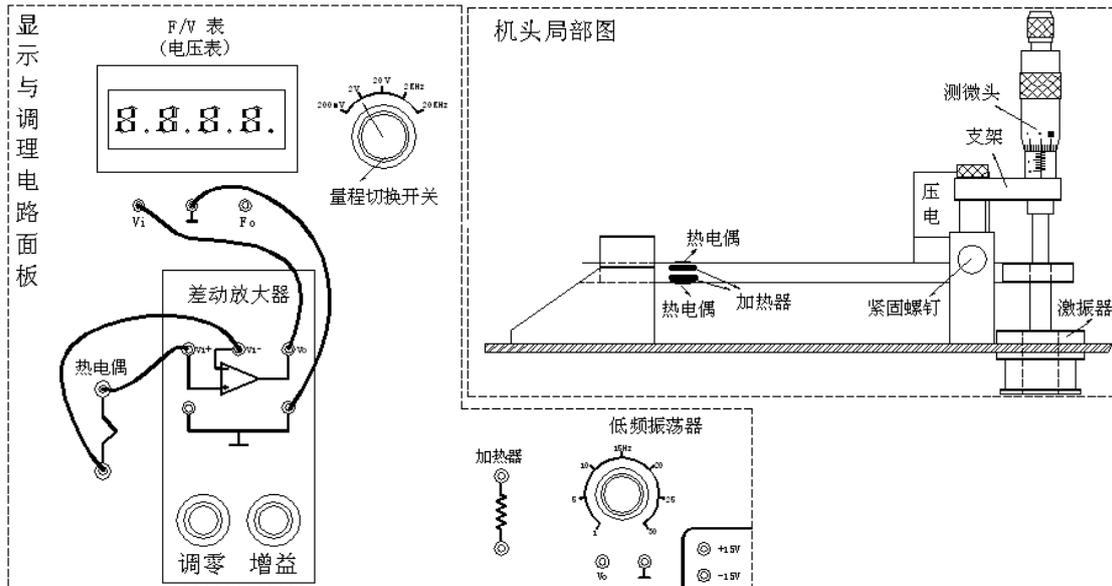


图 21—2 热电偶无温差时差动放大器调零接线示意图

2、将-15V 直流电源接入加热器的一端，加热器的另一端接地，如图 21—3 所示。观察电压表显示值的变化，待显示值稳定不变时记录下电压表显示的电压值 V 。此电压值 V 为二个铜—康铜热电偶串联经放大 100 倍后的热电势。

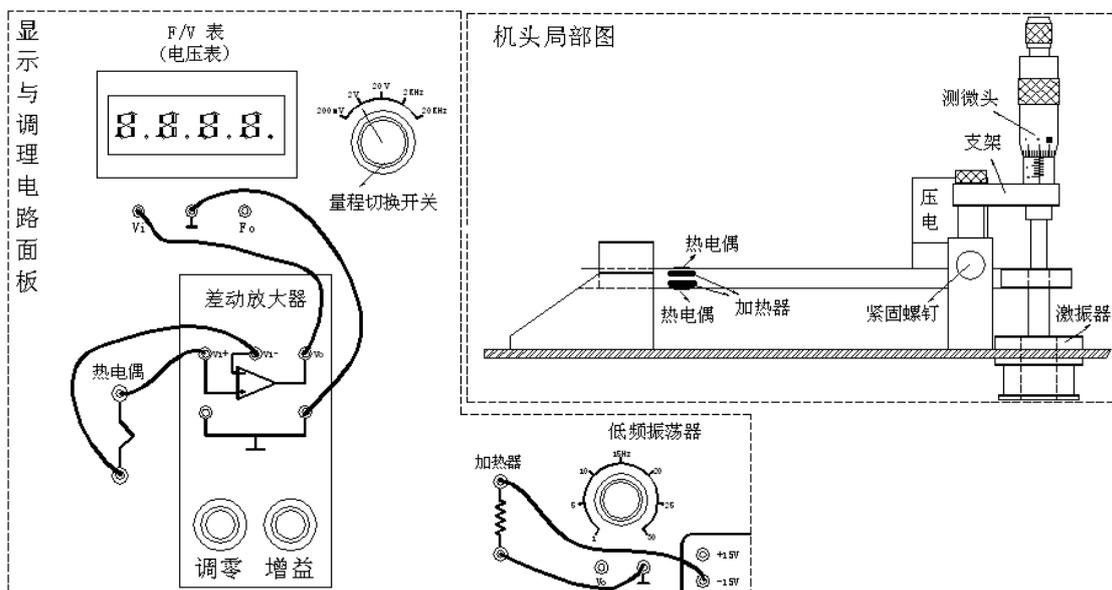


图 21—3 热电偶测温实验接线示意图

3、根据热电偶的热电势与温度之间的关系式： $E(t, t_0) = E(t, t_n) + E(t_n, t_0)$ 计算热电势。

式中： t -----热电偶的热端（工作端或称测温端）温度。

t_n -----热电偶的冷端（自由端即热电势输出端）温度也就是室温。

t_0 ----- 0°C

(1)、首先计算热端温度为 t ，冷端温度为室温时热电势： $E(t, t_n) = \text{电压表 } V \div (100 \times 2)$

式中：100 为差动放大器的放大倍数，2 为个热电偶。

(2)、其次查以下所附铜—康铜热电偶分度表，得到热端温度为室温（温度计测得），冷端温度为 0℃时的热电势 $E(t_n, t_0)$ ：

(3)、最后计算热端温度为 t ，冷端温度为 0℃时的热电势： $E(t, t_0) = E(t, t_n) + E(t_n, t_0)$ ，根据计算结果，查分度表得到所测温度 t （加热器功率较小，升温 10℃左右）。

附表：铜—康铜热电偶分度表(自由端温度为 0℃时 t —mV 对应值)

分度号：T (自由端温度 0℃)

工作端 温度℃	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	热 电 动 势 (mV)									
-10	-0.383	-0.421	-0.459	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720
0	-0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.351
10	0.391	0.430	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749
20	0.789	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.032	1.073	1.114	1.155
30	1.196	1.237	1.279	1.320	1.361	1.403	1.444	1.486	1.528	1.569
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.865	1.907	1.950	1.992
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864
70	2.908	2.953	2.997	3.042	3.087	3.131	3.176	3.221	3.266	3.312
80	3.357	3.402	3.447	3.493	3.538	3.584	3.630	3.676	3.721	3.767
90	3.813	3.859	3.906	3.952	3.998	4.044	4.091	4.137	4.184	4.231
100	4.277	4.324	4.371	4.418	4.465	4.512	4.559	4.607	4.654	4.701

4、将加热器的-15V 电源断开，观察电压表显示值是否下降。实验完毕，关闭所有电源。

实验二十二 NTC 热敏电阻温度特性实验

一、实验目的：定性了解 NTC 热敏电阻的温度特性。

二、实验原理：热敏电阻的温度系数有正有负，因此分成两类：PTC 热敏电阻(正温度系数：温度升高而电阻值变大)与 NTC 热敏电阻(负温度系数：温度升高而电阻值变小)。一般 NTC 热敏电阻测量范围较宽，主要用于温度测量；而 PTC 突变型热敏电阻的温度范围较窄，一般用于恒温加热控制或温度开关，也用于彩电中作自动消磁元件。有些功率 PTC 也作为发热元件用。PTC 缓变型热敏电阻可用作温度补偿或作温度测量。

一般的 NTC 热敏电阻大都是用 Mn, Co, Ni, Fe 等过渡金属氧化物按一定比例混合，采用陶瓷工艺制备而成的，它们具有 P 型半导体的特性。热敏电阻具有体积小、重量轻、热惯性小、工作寿命长、价格便宜，并且本身阻值大，不需考虑引线长度带来的误差，适用于远距离传输等优点。但热敏电阻也有：非线性大、稳定性差、有老化现象、误差较大、离散性大(互换性不好)等缺点。一般只适用于低精度的温度测量。一般适用于 $-50^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的低精度测量及温度补偿、温度控制等各种电路中。NTC 热敏电阻 R_T 温度特性实验原理如图 22—1 所示，恒压电源供电 $V_s=2\text{V}$ ， W_{2L} 为采样电阻(可调节)。计算公式： $V_i = [W_{2L}/(R_T+W_{2L})] \cdot V_s$ 式中： $V_s=2\text{V}$ 、 R_T 为热电阻、 W_{2L} 为 W_2 活动触点到地的阻值作为采样电阻。

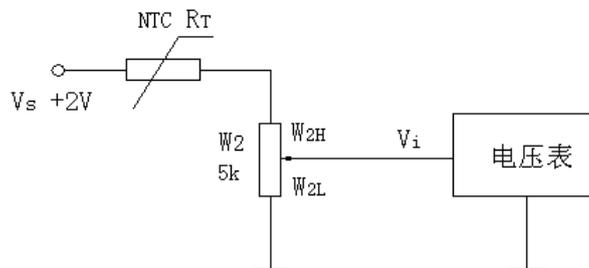


图 22—1 热敏电阻温度特性实验原理图

三、需用器件与单元：机头平行梁中的热敏电阻、加热器；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2\text{V}\sim \pm 10\text{V}$ 步进可调直流稳压电源、 -15V 直流稳压电源；调理电路面板中传感器输出单元中的 R_T 热电阻、加热器；调理电路单元中的电桥、数显万用表(自备)。

四、实验步骤：

1、用数显万用表的 20k 电阻档测一下 R_T 热敏电阻在室温时的阻值。 R_T 是一个黑色(或兰色或棕色)园珠状元件，封装在双平行梁的上梁表面。加热器的阻值为 100Ω 左右封装在双平行应变梁的上下梁之间。如图 22—2 所示。

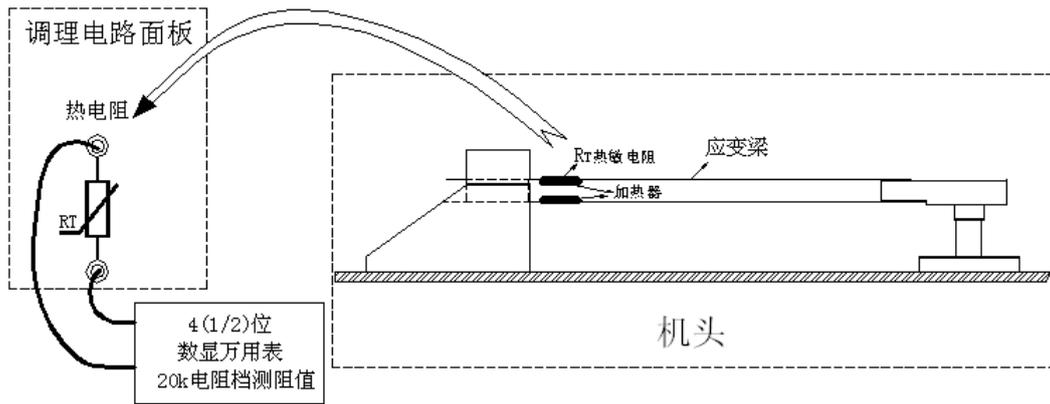


图 22—2 R_T 热电阻室温阻值测量示意图

2、调节 NTC 热敏电阻在室温时输出为 100mV：将 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源切换到 2V 档，按图 22—3 接线，将 F/V 表切换开关置 2V 档，检查接线无误后合上主电源开关。调节 W2 使 F/V 表显示为 100mV。

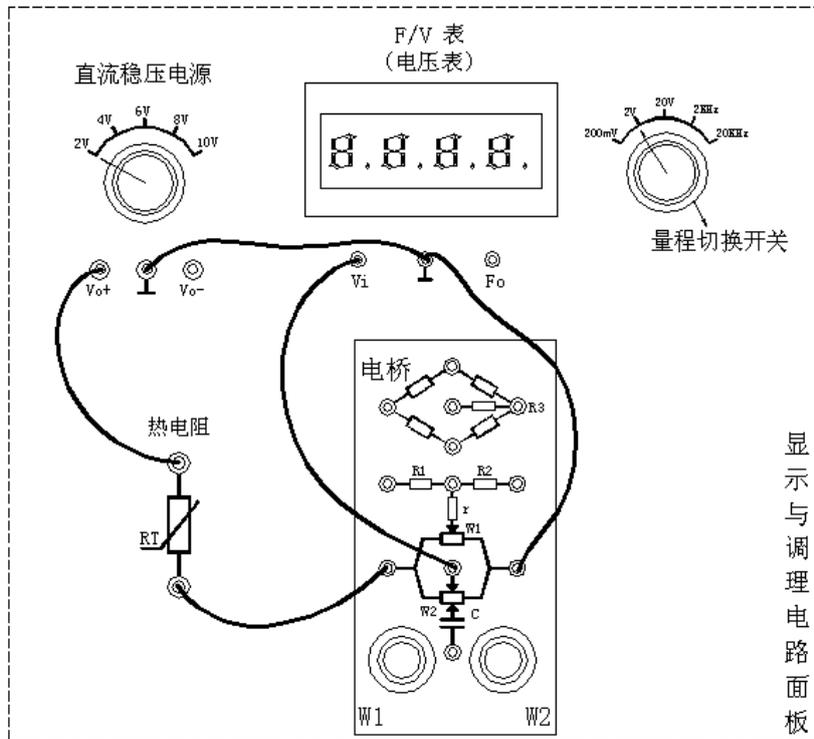


图 22—3 NTC 热敏电阻在室温时输出为 100mV 接线图

3、将加热器接到-15V 稳压电源上，如图 22—5 所示，观察 F/V 表的显示变化(大约 5~6 分钟时间)。再将加热器电源去掉，如图 22—4 所示，再观察 F/V 表的显示变化。由此可见，当温度 升高 时， R_T 阻值 ， V_i 。当温度 下降 时， R_T 阻值 ， V_i 。实验完毕，关闭所有电源。

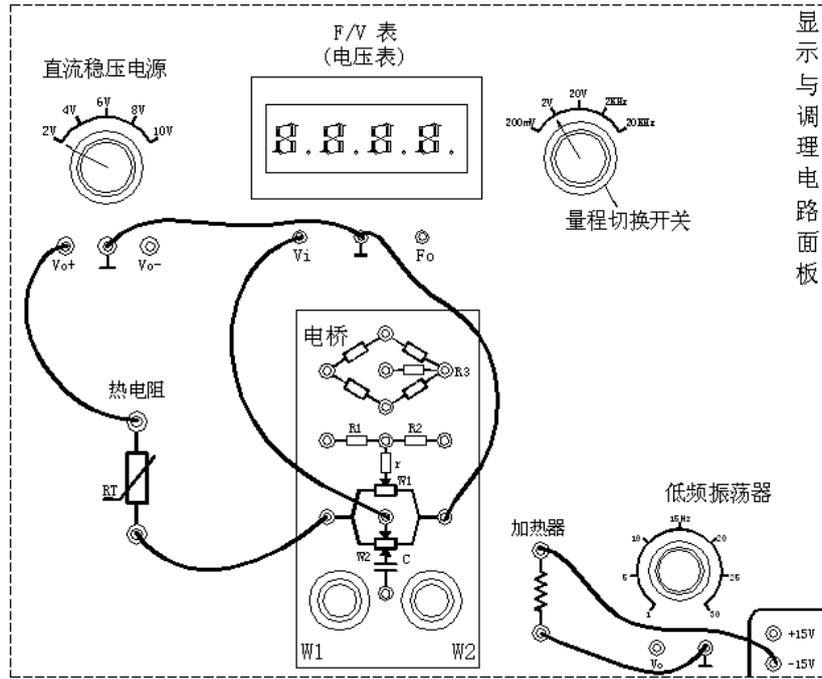


图 22—5 NTC 热敏电阻受热时温度特性实验接线图

实验二十三 PN 结温度传感器温度特性实验

- 一、实验目的：定性了解 PN 结温度传感器的温度特性。
- 二、基本原理：晶体二极管、三极管的 PN 结正向电压是随温度变化而变化的，利用 PN 结的这个温度特性可制成 PN 结温度传感器。目前用于制造温敏二极管的材料主要有锗、硅、砷化镓、碳化硅等。对于硅二极管，当电流保持不变时，温度每升高 1°C ，正向电压下降约 2mV 。它的温度系数为 $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ ，它具有线性好、时间常数小 ($0.2\sim 2$ 秒)、灵敏度高等优点，测温范围为： $-50^{\circ}\text{C}\sim +120^{\circ}\text{C}$ 。其不足之处是离散性较大，互换性较差。PN 结测温实验原理图如图 23—1 所示。

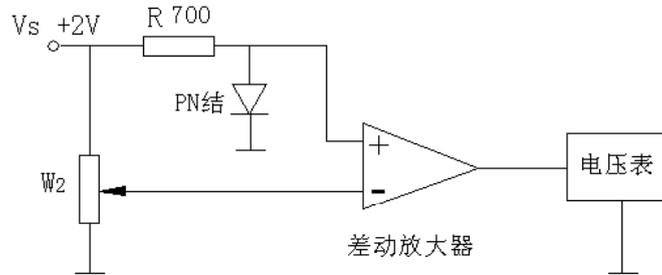


图 23—1 PN 结测温特性实验原理图

三、需用器件与单元：机头平行梁中的 PN 结(硅二极管)、加热器；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源、 $-15V$ 直流稳压电源；调理电路面板中传感器输出单元中的 PN 结、加热器；调理电路单元中的电桥、差动放大器；万用表(自备)。

四、实验步骤：

1、根据 23—2 示意图用自备的万用表(二极管档)判断 PN 结单向导通特性(可互换万用表表笔判断)。

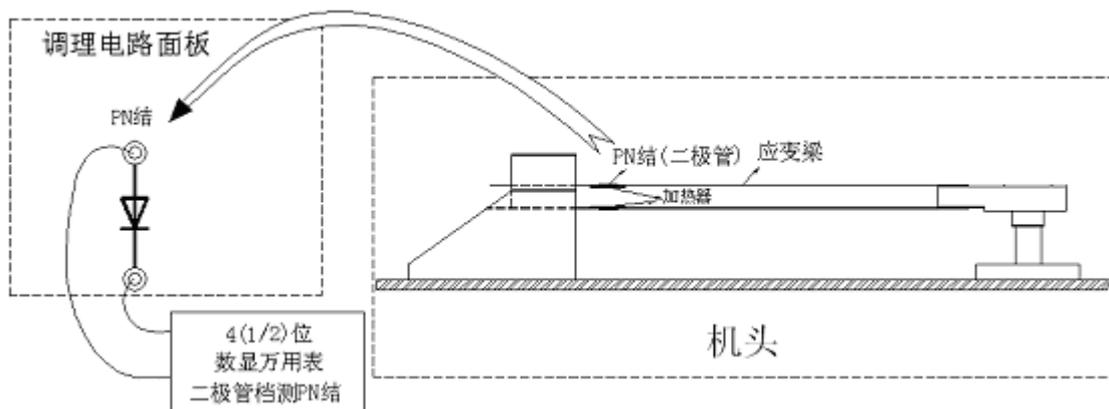


图 23—2 PN 结单向导通特性判断

3、差动放大器调零：在显示调理电路面板上按图 23—3 示意接线。将电压表的量程切换开关切换到 200mV 档，检查接线无误后合上主、副电源开关。将差动放大器的增益电位器按顺时针方向缓慢转到底，再逆时针回转一点点(防电位器的可调触点在极限端点位置接触不良)，调节差动放大器的调零电位器，使电压表显示电压为 0。关闭主、副电源。

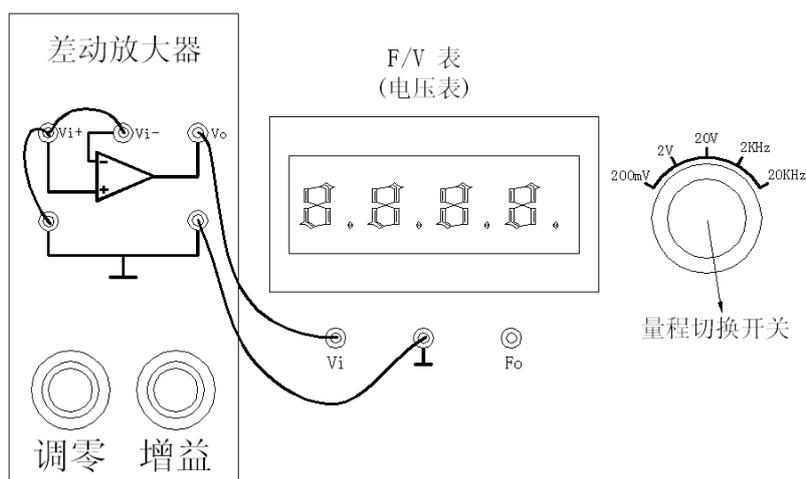


图 23—3 差动放大器调零接线图

4、PN 结室温时调零：将 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源切换到 2V 档，按 23—4 示意图接线，将电压表量程切换到 2V 档，检查接线无误后合上主、副电源开关。调节电桥中的 W2 使电压表显示为 0。

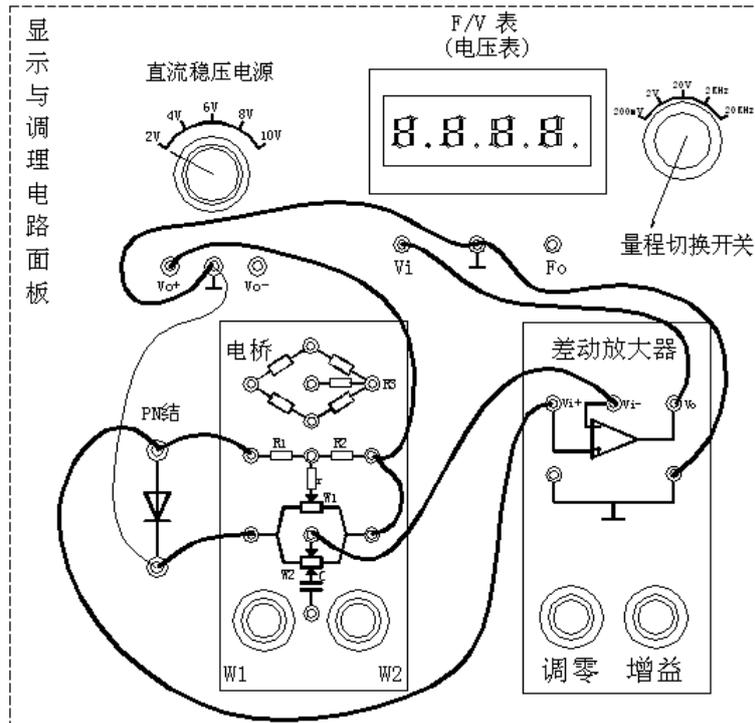


图 23—4 PN 结室温时调零接线图

5、PN结受热时温度特性：将-15V稳压电源接到加热器上，如图 23—5 所示，观察电压表的显示变化(大约 5~6 分钟时间)。再将加热器-15V电源去掉，观察电压表的显示变化。由此可见，当温度 升高 时，PN 结的电压降 ， V_i 。当温度 下降 时，PN 结的电压降 ， V_i 。实验完毕，关闭所有电源。

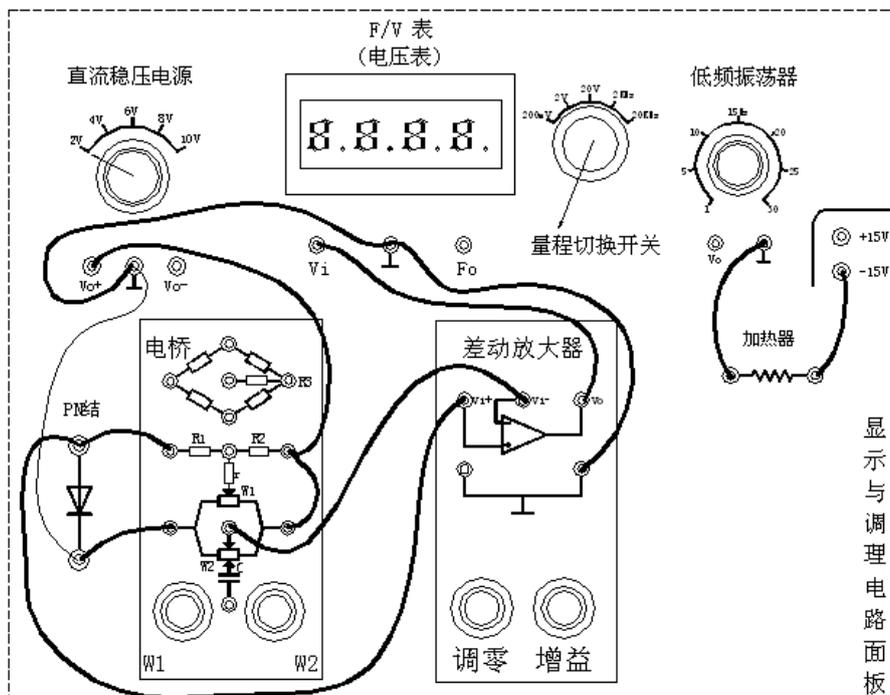


图 23—5 PN 结受热时温度特性实验接线图

实验二十四 线性霍尔式传感器位移特性实验

一、实验目的：了解霍尔式传感器原理与应用。

二、基本原理：霍尔式传感器是一种磁敏传感器，基于霍尔效应原理工作。它将被测量的磁场变化（或以磁场为媒体）转换成电动势输出。霍尔效应是具有载流子的半导体同时处在电场和磁场中而产生电势的一种现象。如图 24—1（带正电的载流子）所示，把一块宽为 b ，厚为 d 的导电板放在磁感应强度为 B 的磁场中，并在导电板中通以纵向电流 I ，此时在板

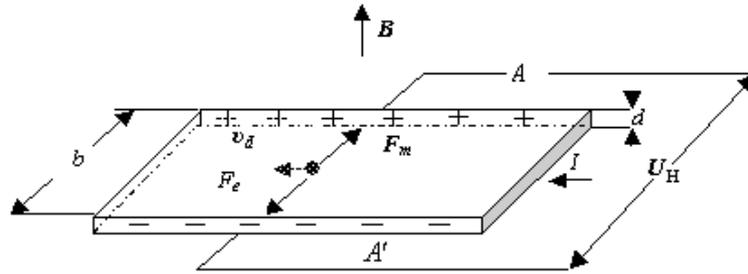


图 24—1 霍尔效应原理

的横向两侧面 A, A' 之间就呈现出一定的电势差，这一现象称为霍尔效应（霍尔效应可以用洛伦兹力来解释），所产生的电势差 U_H 称霍尔电压。霍尔效应的数学表达式为：

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$$

式中： $R_H = -1 / (ne)$ 是由半导体本身载流子迁移率决定的物理常数，称为霍尔系数；

$K_H = R_H / d$ 灵敏度系数，与材料的物理性质和几何尺寸有关。

具有上述霍尔效应的元件称为霍尔元件，霍尔元件大多采用 N 型半导体材料（金属材料中自由电子浓度 n 很高，因此 R_H 很小，使输出 U_H 极小，不宜作霍尔元件），厚度 d 只有 $1\mu\text{m}$ 左右。

霍尔传感器有霍尔元件和集成霍尔传感器两种类型。集成霍尔传感器是把霍尔元件、放大器做在一个芯片上的集成电路型结构，与霍尔元件相比，它具有微型化、灵敏度高、可靠性高、寿命长、功耗低、负载能力强以及使用方便等等优点。

本实验采用的霍尔式位移（小位移 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$ ）传感器是由线性霍尔元件、两只半圆形永久磁钢组成，其它很多物理量如：力、压力、机械振动等本质上都可转变成位移的变化来测量。霍尔式位移传感器的工作原理和实验电路原理如图 24—2 (a)、(b) 所示。将磁场强度相同的两只永久磁钢极性相对放置着，线性霍尔元件置于两块磁钢间的上下中点，其磁感应强度为 0，设这个位置为位移的零点，即 $X=0$ ，因磁感应强度 $B=0$ ，故输出电压 $U_H=0$ 。当霍尔元件沿 X 轴有位移时，由于 $B \neq 0$ ，则有一电压 U_H 输出， U_H 经差动放大器放大输出为 V 。 V 与 B 、 B 与 X 有一一对应的线性关系。图 24—2(b) 中的 W_1 是调节霍尔片的不定位电势，

所谓不定位电势： $B=0$ 时 $U_H \neq 0$ 。

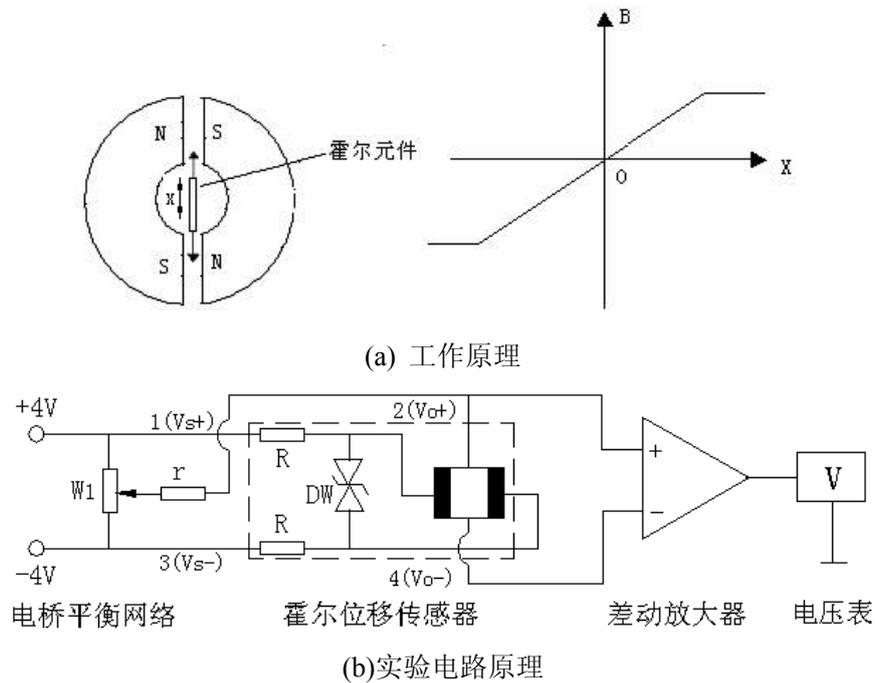


图 24—2 霍尔式位移传感器工作原理图

* 注意：线性霍尔元件有四个引线端。涂黑二端 1 (V_{s+})、3 (V_{s-}) 是电源输入激励端，另外二端 2 (V_{o+})、4 (V_{o-}) 是输出端。接线时，电源输入激励端与输出端千万不能颠倒，否则霍尔元件要损坏。

三、需用器件与单元：机头中的振动台、测微头、霍尔位移传感器；显示面板中的 F/V 表(或电压表)、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板传感器输出单元中的霍尔；调理电路单元中的电桥、差动放大器。

四、实验步骤：

1、差动放大器调零：按图 24—3 示意接线，电压表 (F/V 表) 量程切换开关打到 2V 档，检查接线无误后合上主、副电源开关。将差动放大器的增益电位器顺时针方向缓慢转到底，再逆时针回转一点点 (防电位器的可调触点在极限端点位置接触不良)；调节差动放大器的调零电位器，使电压表显示为 0。关闭主电源。

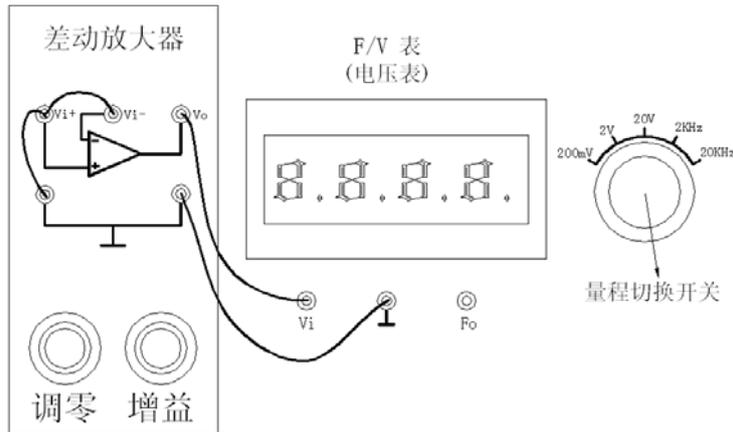


图 24—3 差动放大器调零接线图

2、在振动台与测微头吸合的情况下，调节测微头到 10mm 处使振动台上的霍尔片大约处在两块磁钢间的上、下中点位置（目测）。将 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源切换到 4V 档，再按 24—4 示意图接线，将差动放大器的增益电位器逆时针方向缓慢转到底（增益最小）。检查接线无误后合上主电源开关，仔细调节电桥单元中的 W1 电位器，使电压表显示 0V。

*注意：线性霍尔元件有四个引线端。涂黑二端 1 (V_{s+})、3 (V_{s-}) 是电源输入激励端，另外二个 2 (V_{o+})、4 (V_{o-}) 是输出端。接线时，电源输入激励端与输出端千万不能颠倒，否则霍尔元件要损坏。

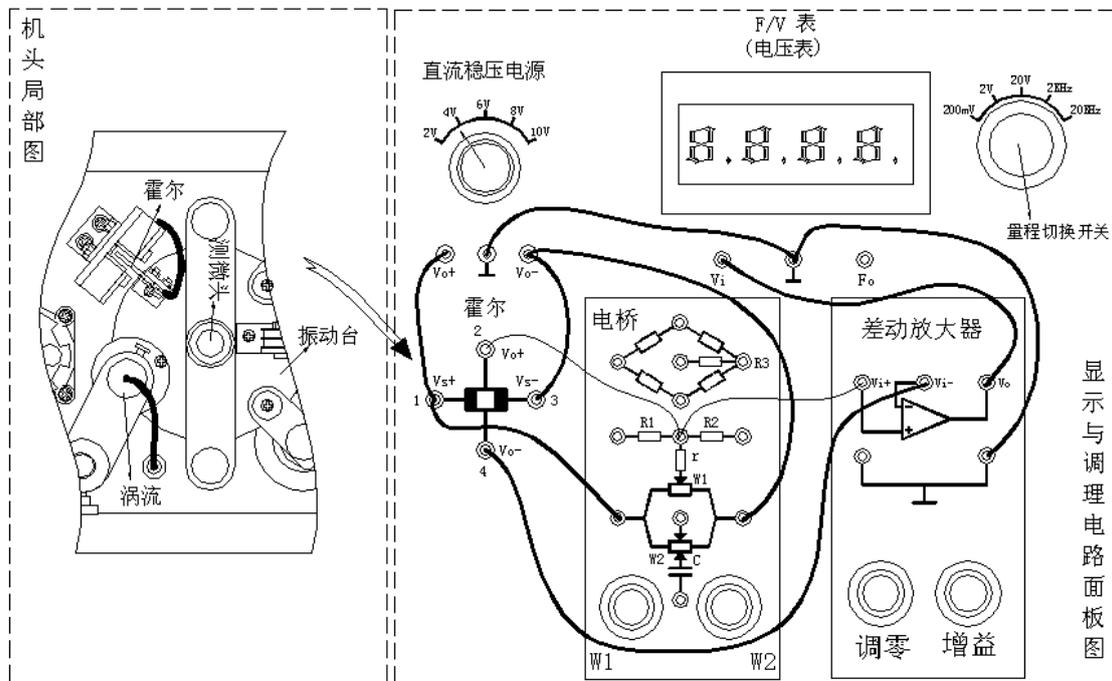


图 24—4 线性霍尔传感器(直流激励)位移特性实验接线示意图

3、将测微头从 10mm 处调到 15mm 处作为位移起点并记录电压表读数。以后，反方向(顺时针方向)仔细调节测微头的微分筒(0.01mm/每小格) $\Delta X=0.1\text{mm}$ (实验总位移从 15 mm~5mm)从电压表上读出相应的电压 V_0 值，填入下表 24。

表 24 霍尔传感器位移实验数据

X (mm)										
V_0 (V)										

4、根据表 24 实验数据作出 $V-X$ 特性实验曲线，在实验曲线上截取线性较好的区域作为传感器的位移量程。

5、分析曲线，计算不同测量范围 ($\pm 0.5\text{mm}$ 、 $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 2\text{mm}$)时的灵敏度和非线性误差。实验完毕，关闭电源。

实验二十五 磁电式传感器特性实验

一、实验目的：了解磁电式测量转速的原理。

二、基本原理：磁电传感器是一种将被测物理量转换成为感应电势的有源传感器（不需要电源激励），也称为电动式传感器或感应式传感器。根据电磁感应定律，一个匝数为 N 的线圈在磁场中切割磁力线时，穿过线圈的磁通量发生变化，线圈两端就会产生出感应电势，线圈中感应电势： $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 。线圈感应电势的大小在线圈匝数一定的情况下与穿过该线圈的磁通变化率成正比。当传感器的线圈匝数和永久磁钢选定(即磁场强度已定)后，使穿过线圈的磁通发生变化的方法通常有两种：一种是让线圈和磁力线作相对运动，即利用线圈切割磁力线而使线圈产生感应电势；另一种则是把线圈和磁钢部固定，靠衔铁运动来改变磁路中的磁阻，从而改变通过线圈的磁通。因此，磁电式传感器可分成两大类型：动磁式及可动衔铁式(即可变磁阻式)。本实验应用动磁式磁电传感器，是速度型传感器 ($e = -N \frac{d\Phi}{dt}$)，实验原理框图如图 25—1 所示。

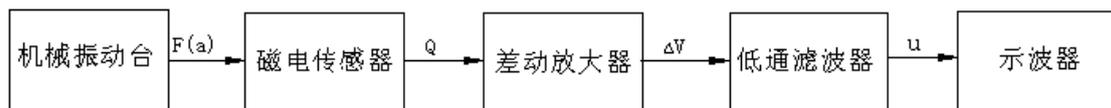


图 25—1 实验原理框图

三、需用器件与单元：机头中的振动台、激振器、磁电传感器；显示面板中的低频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的磁电、激振；调理电路面板中的差动放大器、低通滤

波器；双踪示波器（自备）。

四、实验步骤：

1、调节测微头远离振动台，不能妨碍振动台的上下运动。按图 25-2 示意接线，用示波器〔正确选择双线（双踪）示波器的“触发”方式及其它(TIME/DIV：在 50mS~20mS 范围内选择；VOLTS/DIV：1V~0.1V 范围内选择)设置〕监测差动放大器及低通滤波器（传感器信号）输出。

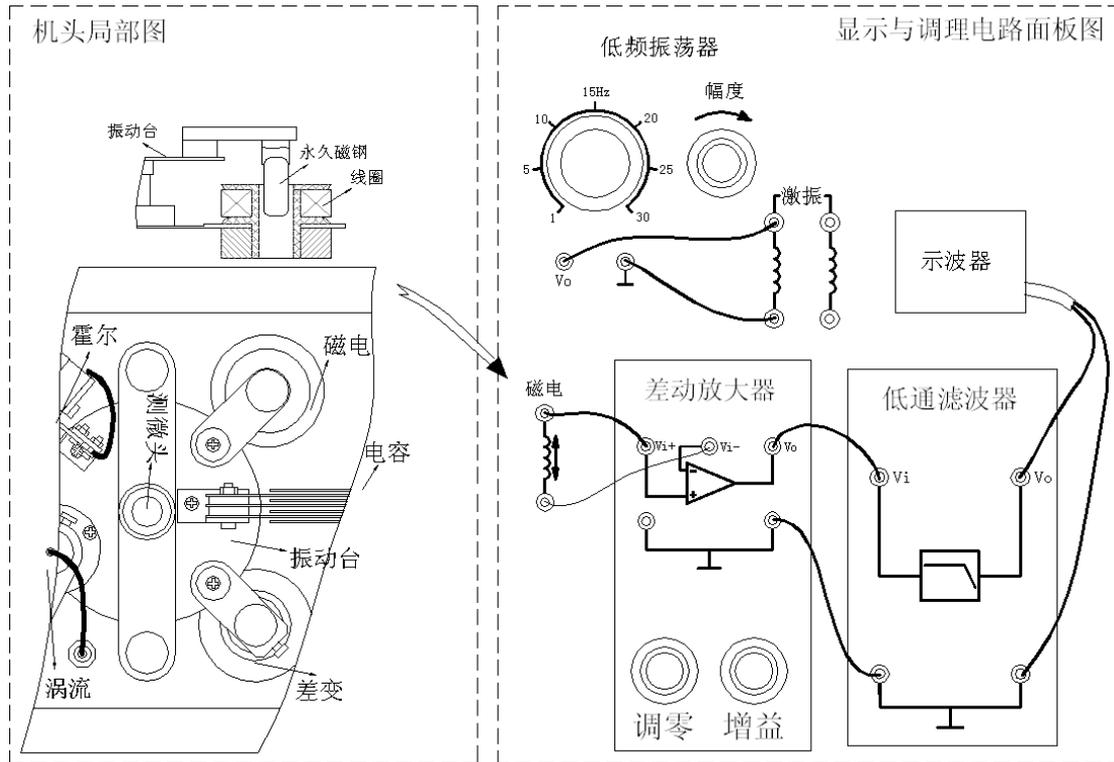


图 35—2 磁电传感器实验接线示意图

2、将低频振荡器幅度旋钮逆时针转到底(低频输出幅度最小)，将低频振荡器的频率调到 8Hz 左右，将差动放大器的增益电位器顺时针方向缓慢转到底，再逆时针回转 1/2。检查接线无误后合上主、副电源开关，调节差动放大器的调零电位器使示波器的轨迹线（扫描线）移到中间（当示波器设置在 DC 档有效）。

3、调节低频振荡器幅度旋钮，使振动台振动较为明显（如振动不明显再调节频率），观察低通滤波器（传感器信号）输出波形的周期和幅值。

4、在振动台起振范围内调节低频振荡器的频率观察输出波形的周期和幅值，调节低频振荡器的幅度观察输出波形的周期和幅值。

5、从实验现象分析磁电传感器的特性（提示：与振动台的频率有关、速度型）。实验完毕关闭所有电源。

实验二十六 光电传感器测转速实验

一、实验目的：了解光电转速传感器测量转速的原理及方法。

二、基本原理：光电式转速传感器有反射型和透射型二种，本实验装置是透射型的(光电断续器也称光耦)，传感器端部二内侧分别装有发光管和光电管，发光管发出的光源透过转盘上通孔后由光电管接收转换成电信号，由于转盘上有均匀间隔的6个孔，转动时将获得与转速有关的脉冲数，脉冲经处理由频率表显示 f ，即可得到转速 $n=10f$ 。实验原理框图如图 26—1 所示。



图 26—1 光耦测转速实验原理框图

三、需用器件与单元：机头中的小电机、光电传感器(已装在转速盘上)；显示面板中的 F/V 表、电机控制、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板传感器输出单元中的光电。

四、实验步骤：

1、按图 26—2 所示接线，将 F / V 表切换到频率 2KHz 档。直流稳压电源调到 10V 档。

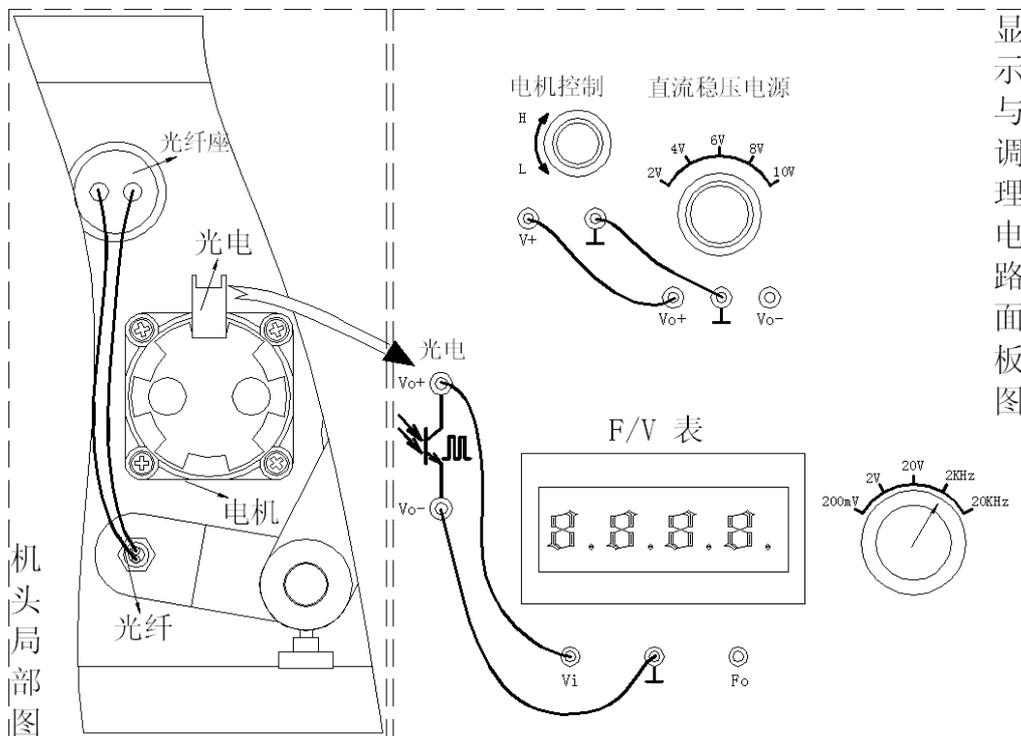


图 26—2 光电传感器测转速实验接线示意图

2、检查接线无误后，合上主、副电源开关，调节电机控制旋钮，F / V 表就显示相应的频率 f ，计算转速为 $n=10f$ 。实验完毕，关闭主、副电源。

实验二十七 光纤位移传感器测位移特性实验

一、实验目的：了解光纤位移传感器的工作原理和性能。

二、基本原理：光纤传感器是利用光纤的特性研制而成的传感器。光纤具有很多优异的性能，例如：抗电磁干扰和原子辐射的性能，径细、质软、重量轻的机械性能，绝缘、无感应的电气性能，耐水、耐高温、耐腐蚀的化学性能等，它能够在人达不到的地方(如高温区)，或者对人有害的地区(如核辐射区)，起到人的耳目的作用，而且还能超越人的生理界限，接收人的感官所感受不到的外界信息。

光纤传感器主要分为两类：功能型光纤传感器及非功能型光纤传感器(也称为物性型和结构型)。功能型光纤传感器利用对外界信息具有敏感能力和检测功能的光纤，构成“传”和“感”合为一体的传感器。这里光纤不仅起传光的作用，而且还起敏感作用。工作时利用检测量去改变描述光束的一些基本参数，如光的强度、相位、偏振、频率等，它们的改变反映了被测量的变化。由于对光信号的检测通常使用光电二极管等光电元件，所以光的那些参数的变化，最终都要被光接收器接收并被转换成光强度及相位的变化。这些变化经信号处理后，就可得到被测的物理量。应用光纤传感器的这种特性可以实现力，压力、温度等物理参数的测量。非功能型光纤传感器主要是利用光纤对光的传输作用，由其他敏感元件与光纤信息传输回路组成测试系统，光纤在此仅起传输作用。

本实验采用的是传光型光纤位移传感器，它由两束光纤混合后，组成 Y 形光纤，半园分布即双 D 分布，一束光纤端部与光源相接发射光束，另一束端部与光电转换器相接接收光束。两光束混合后的端部是工作端亦称探头，它与被测体相距 d ，由光源发出的光纤传到端部出射后再经被测体反射回来，另一束光纤接收光信号由光电转换器转换成电量，如图 27—1 所示。

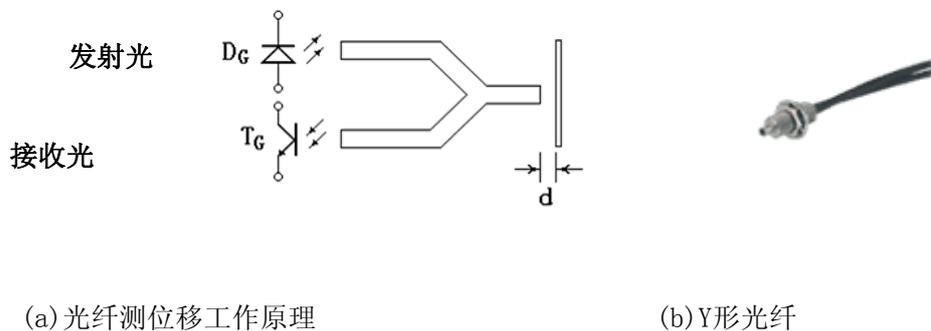


图 27—1 Y形光纤测位移工作原理图

传光型光纤传感器位移量测是根据传送光纤之光场与受信光纤交叉地方视景做决定。当光纤探头与被测物接触或零间隙时($d=0$)，则全部传输光量直接被反射至传输光纤。没有提供光给接收端之光纤，输出讯号便为“零”。当探头与被测物之距离增加时，接收端之光纤接收之光量也越多，输出讯号便增大，当探头与被测物之距离增加到一定值时，接收端光纤全部被照明为止，此时也被称之为“光峰值”。达到光峰值之后，探针与被测物之距离继续增加时，将造成反射光扩散或超过接收端接收视野。使得输出之讯号与量测距离成反比例关系。如图 27—2 曲线所示，一般都选用线性范围较好的前坡为测试区域。

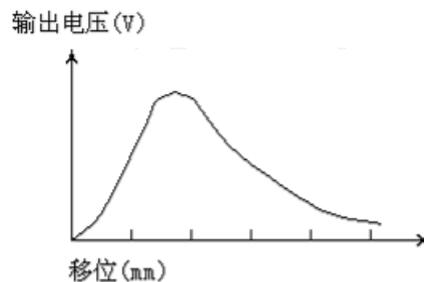


图 27—2 光纤位移特性曲线

三、器件与单元：机头中的振动台、被测体(铁圆片抛光反射面)、Y 形光纤探头、光纤座(光电变换)、测微头；显示面板中的 F/V 表；调理电路面板传感器输出单元中的光纤；调理电路单元中的差动放大器。

四、实验步骤：

1、拧松光纤探头支架安装轴套上的螺钉，小心缓慢地拔出支架安装轴。观察二根多模光纤组成的 Y 形位移传感器：将二根光纤尾部端面(包铁端部)对住自然光照射，观察探头端面现象，当其中一根光纤的尾部端面用不透光纸挡住时，探头端面为半圆双 D 形结构。

2、按图 27—3 示意安装、接线：(1)在振动台上安装被测体(铁圆片抛光反射面)，在振动台与测微头吸合的情况下调节测微头到 10mm 处。(2)安装光纤：安装光纤时，要用手抓捏两根光纤尾部的包铁部分轻轻插入光纤座中，绝对不能用手抓捏光纤的黑色包皮部分进行插拔，插入时不要过分用力，以免损坏光纤座组件中光电管。将光纤探头支架安装轴插入轴套中，调节光纤探头支架，当光纤探头自由贴住振动台的被测体反射面时拧紧轴套的紧固螺钉。(3)再按图 27—3 示意接线。

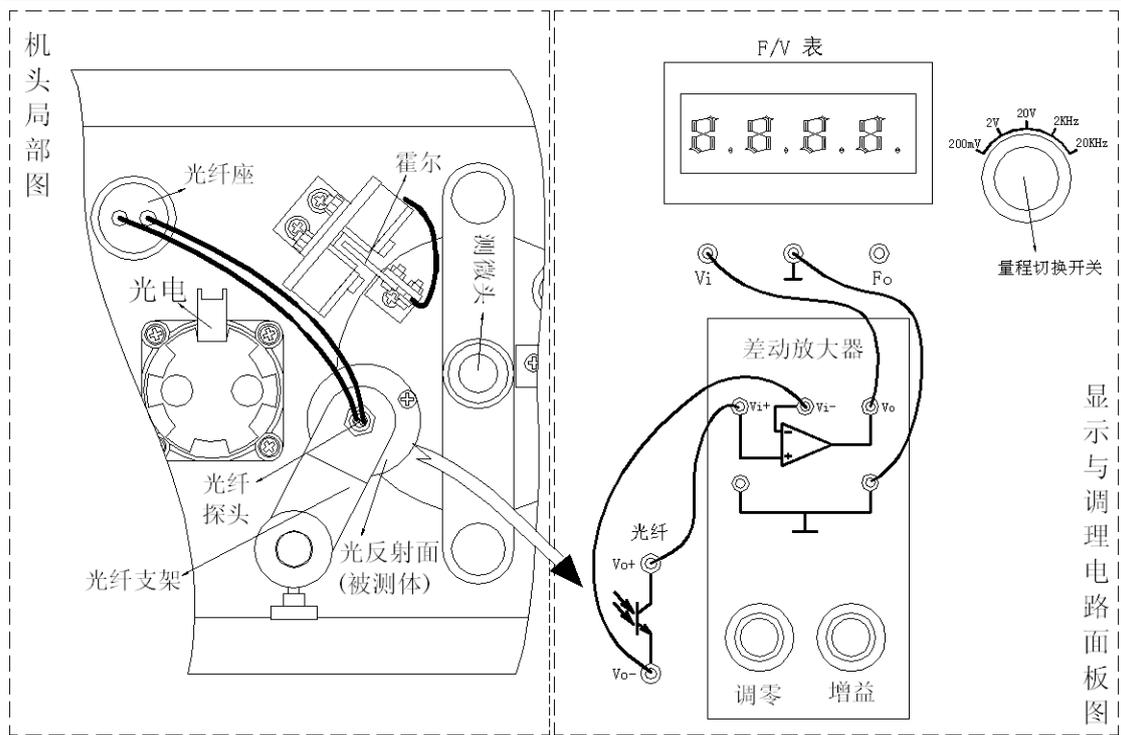


图 27—3 光纤传感器位移实验安装、接线示意图

3、检查接线无误后合上主、副电源开关，将 F / V 表的量程切换开关切换到 2V 档。将差动放大器的增益电位器顺时针方向缓慢转到底后再逆向回转一点点，调节差动放大器的调零电位器使 F / V 表显示为 0。

4、顺时针调节测微头，每隔 $\Delta X=0.1\text{mm}$ 读取电压表显示值（取 $X>8\text{mm}$ 行程的数据），将数据填入表 27。

表 27 光纤位移传感器输出电压与位移数据

X (mm)										
V (v)										

5、根据表 27 中的数据作出实验曲线并找出线性区域较好的范围（前坡）作为光纤位移传感器的量程计算灵敏度和非线性误差。实验完毕，关闭主、副电源。

实验二十八 气敏传感器实验

一、实验目的：了解气敏传感器原理及特性。

二、基本原理：气敏传感器(又称气敏元件)是指能将被测气体浓度转换为与其成一定关系的电量输出的装置或器件。它一般可分为：半导体式、接触燃烧式、红外吸收式、热导率变化式等等。本实验所采用的 TP-3 型 SnO₂ (氧化锡) 半导体气敏传感器是对酒精敏感的电阻型气敏元件；该敏感元件由纳米级 SnO₂ 及适当掺杂混合剂烧结而成，具微珠式结构，应用电路简单，可将传导性变化改变为一个输出信号，与酒精浓度对应。传感器对酒精浓度的响应特性曲线、实物原理如图 28—1 所示。

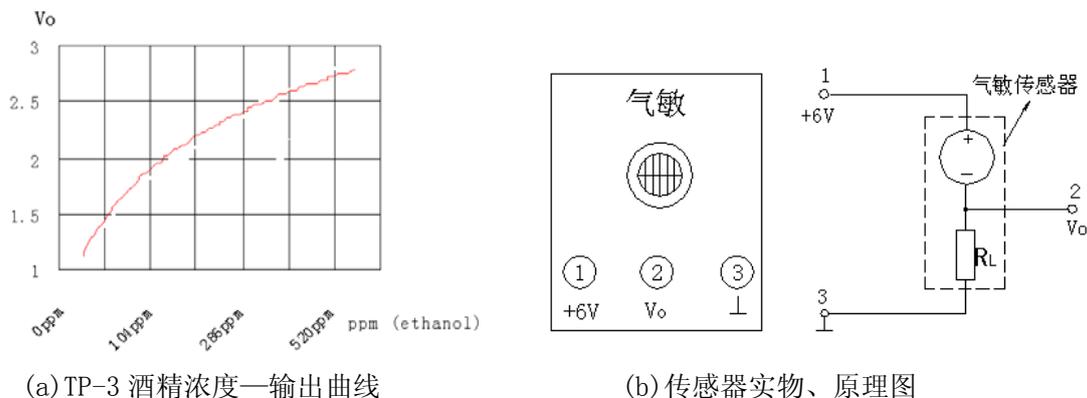


图 28—1 酒精传感器响应特性曲线、实物及原理图

三、需用器件与单元：机头中的气敏传感器；显示面板中的 F/V 表、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；酒精棉球(自备)。

四、实验步骤：

1、按图 28—2 示意接线。

2、将 F/V 表量程切换到 20V 档。检查接线无误后合上主电源开关，传感器通电预热较长时间(至少 5 分钟以上，因传感器长时间不通电的情况下，内阻会很小，上电后 V_o 输出很大，不能即时进入工作状态)后才能工作。

3、等待传感器输出 V_o 较小(小于 1.5V)时，用自备的酒精小棉球靠近传感器端面，并吹 2 次气，使酒精挥发进入传感网内，观察电压表读数变化。实验完毕，关闭主电源。

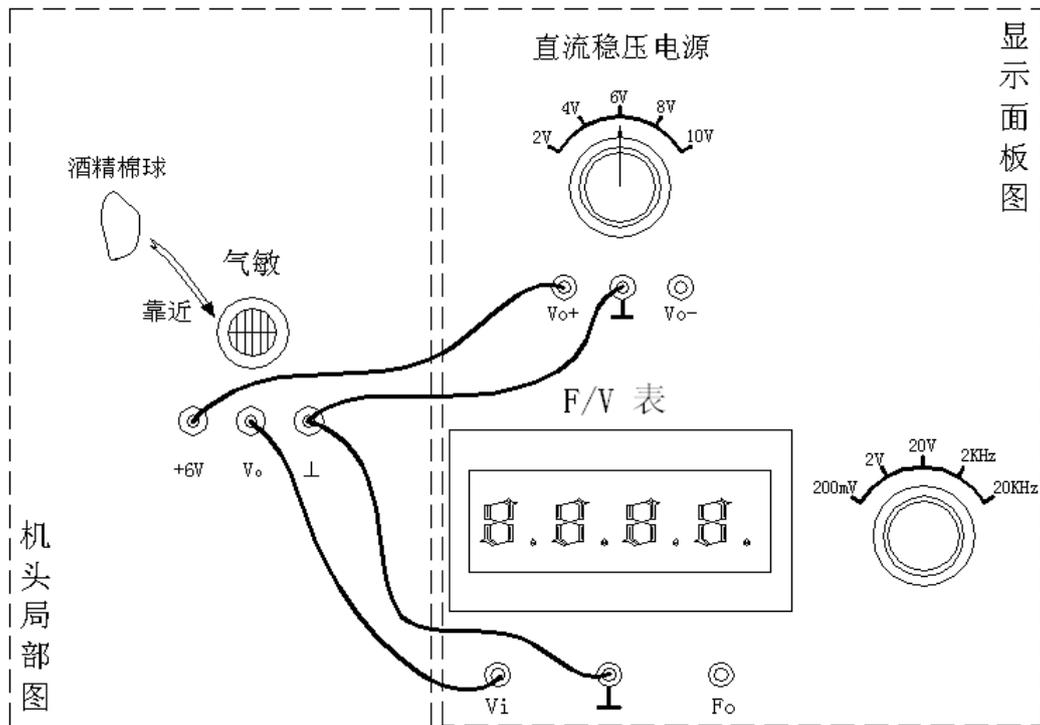


图 28—2 气敏(酒精)传感器实验接线示意图

实验二十九 湿敏传感器实验

一、实验目的：了解湿敏传感器的原理及特性。

二、基本原理：湿度是指空气中所含有的水蒸气量。空气的潮湿程度，一般多用相对湿度概念，即在一定温度下，空气中实际水蒸气压与饱和水蒸气压的比值(用百分比表示)，称为相对湿度(用 RH 表示)。其单位为 %RH。湿敏传感器种类较多，根据水分子易于吸附在固体表面渗透到固体内部的这种特性（称水分子亲和力），湿敏传感器可以分为水分子亲和力型和非水分子亲和力型，本实验所采用的属水分子亲和力型中的高分子材料湿敏元件(湿敏电阻)。它的原理是采用具有感湿功能的高分子聚合物(高分子膜)涂敷在带有导电电极的陶瓷衬底上，导电机理为水分子的存在影响高分子膜内部导电离子的迁移率，形成阻抗随相对湿度变化成对数变化的敏感部件。湿敏膜是高分子电解质，其电阻值的对数与相对湿度是近似线性关系。在电路用字母“ R_H ”表示，测量范围：10%~95%，阻值：几兆欧~几千欧。湿敏传感器实物、实验原理框图如图 29—1 所示。

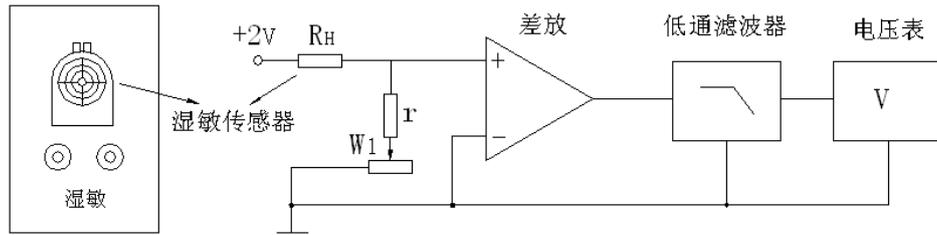


图 29—1 湿敏传感器实物、实验原理框图

三、需用器件与单元：机头中的湿敏传感器；显示面板中的 F/V 表、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路单元中的差动放大器、低通滤波器；潮湿小棉球(自备)。

四、实验步骤：

1、按图 29—2 示意接线。

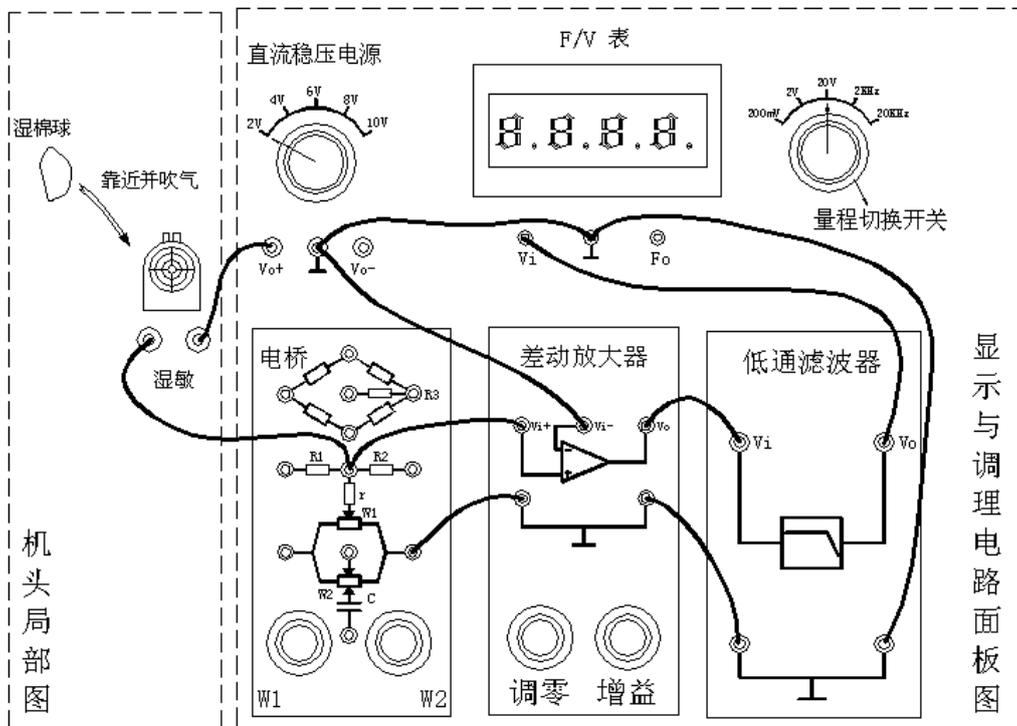


图 29—2 湿敏传感器实验接线示意图

2、将 F / V 表量程切换到 20V 档， $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源切到 2V 档，将差动放大器增益电位器顺时针缓慢转到底后再逆向回转 1/2 位置。检查接线无误后合上主、副电源开关。传感器通电先预热 5 分钟以上，待 F / V 表显示稳定后调节差动放大器零位电位器电压表显示 0V。

3、将潮湿小棉球靠近(可以多准备几个潮湿度不同的小棉球，分别实验)传感器的端口，观察电压表数字变化，此时电压表的指示_____，也就是 R_H 阻值变_____，说明 R_H 检测到了湿度的变化，而且随着湿度的不同阻值变化也不一样。实验完毕，关闭所有电源。

实验三十 数据采集系统实验—静态采集举例

一、实验目的：熟悉数据采集系统在静态实验中的应用。

二、基本原理：数据采集系统(数据采集卡)对实验数据(模拟量)进行采集并与计算机(PC机)通讯，再用计算机对实验数据进行分析处理。其原理框图如图 30—1 所示。

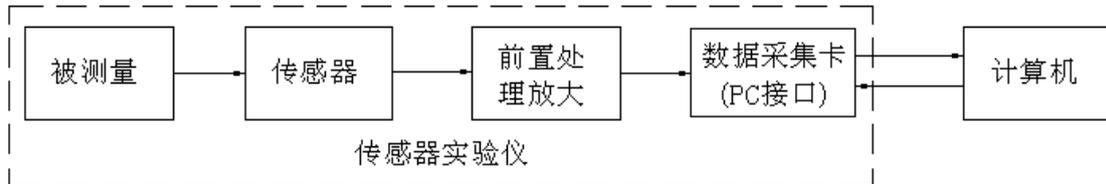


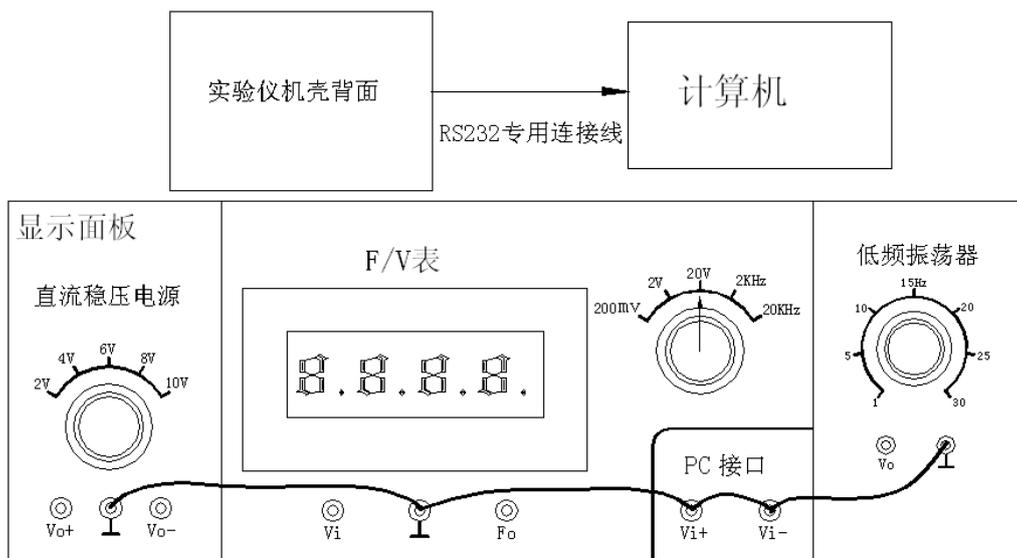
图 30—1 计算机数据采集原理框图

三、需用器件与单元：机头中的应变梁的应变片、测微头；显示面板中的 F/V 表、PC 接口、 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 步进可调直流稳压电源；调理电路面板中传感器输出单元中的箔式应变片、调理电路单元中的电桥、差动放大器；RS232 连线及配套《软件用户手册》、计算机(自备)。

四、实验步骤：

- 1、熟悉、阅读配套软件的<CSY 软件用户手册>并在计算机安装好配套软件。
- 2、软件标定 (A 通道)：

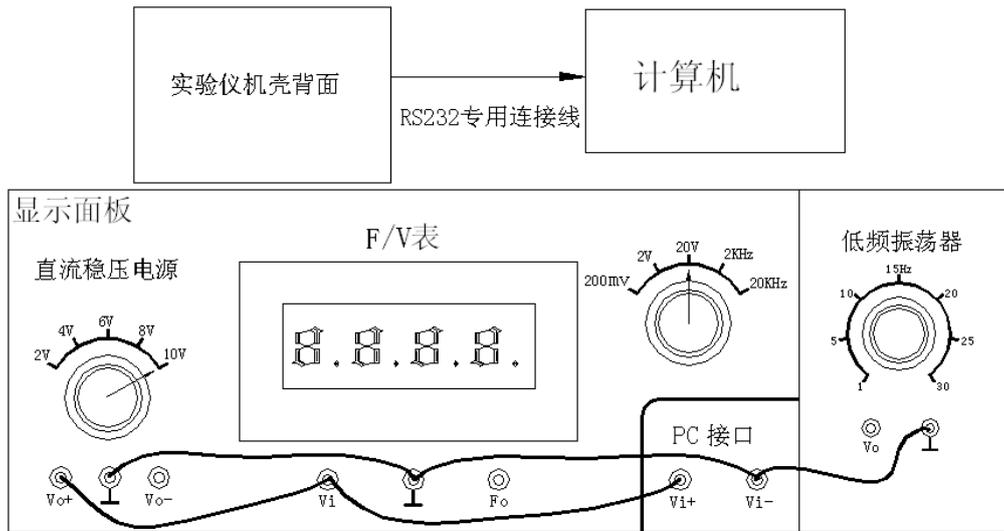
(1)、0V 标定：按图 30—2 (a) 接线（显示面板中的 PC 口短接并接地），检查接线无误后合上实验仪主电源开关，打开计算机进行软件标定。标定方法参阅《软件用户手册》。注意：在计算机显示屏上点击“0V”键三次。



(a) 0V 软件标定接线示意图

(2)、10V 标定：在不关闭电源的情况下，按图 30—2 (b) 接线，将直流稳压电源切到 10V 档。标定方法参阅《软件用户手册》。在计算机显示屏上点击“10V”键三次，然后将电

压表的显示电压 V 转换成 mV 值后输入到计算机中，点击“保存”。



(b) 10V 软件标定接线示意图

图 30—2 软件标定接线示意图

3、利用实验三应变片全桥性能实验的实验数据进行采集：将差分放大器的输出接入显示面板上的 PC 接口。如图 30—3 所示。

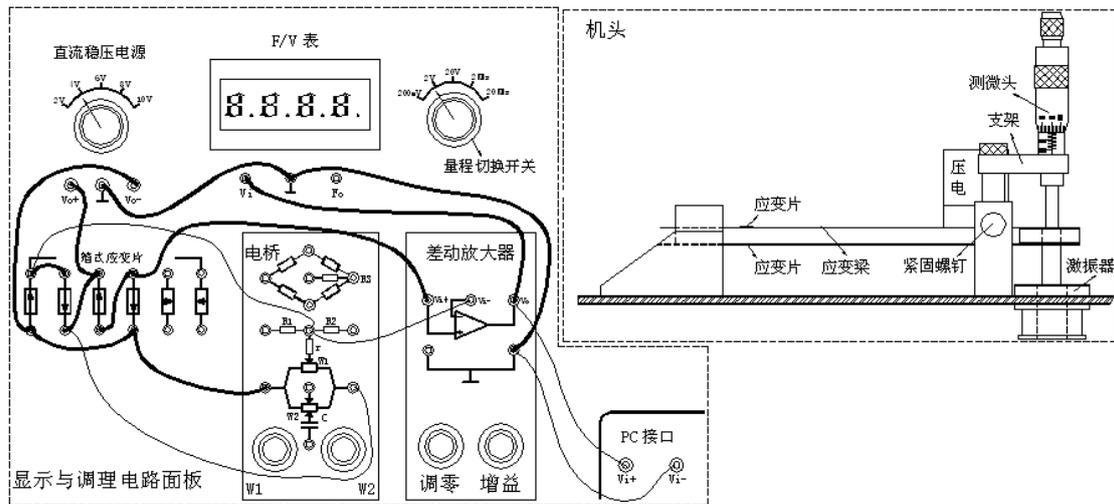


图 30—3 静态数据采集实验接线示意图

4、按《软件用户手册》中的“2、实验操作中的 a、单步采样：”方法并结合“实验三应变片全桥性能实验”步骤进行操作实验。实验完毕，关闭所有电源。

实验三十一 数据采集系统实验—动态采集举例

一、实验目的：熟悉数据采集系统及虚拟示波器在动态检测实验中的应用。

二、基本原理：参阅实验三十。

三、需用器件与单元：机头中的振动台、差动变压器；显示面板中 PC 接口、音频振荡器、低频振荡器；调理电路面板传感器输出单元中的电感、激振；调理电路面板中的电桥、差动放大器、移相器、相敏检波器、低通滤波器；双踪示波器(自备)。RS232 连线及配套《软件用户手册》、计算机(自备)。

四、实验步骤：

1、按实验三十(数据采集系统实验—静态采集举例)中的 1、2 步骤实验(如果这台计算机已经采集过数据实验，则可省略此 1 步骤，直接从下面步骤 2 开始实验)。

2、利用实验十六 差动变压器的应用—振动测量实验进行采集：将实验十六中的低通滤波器输出接到 PC 接口中，如图 31 所示。

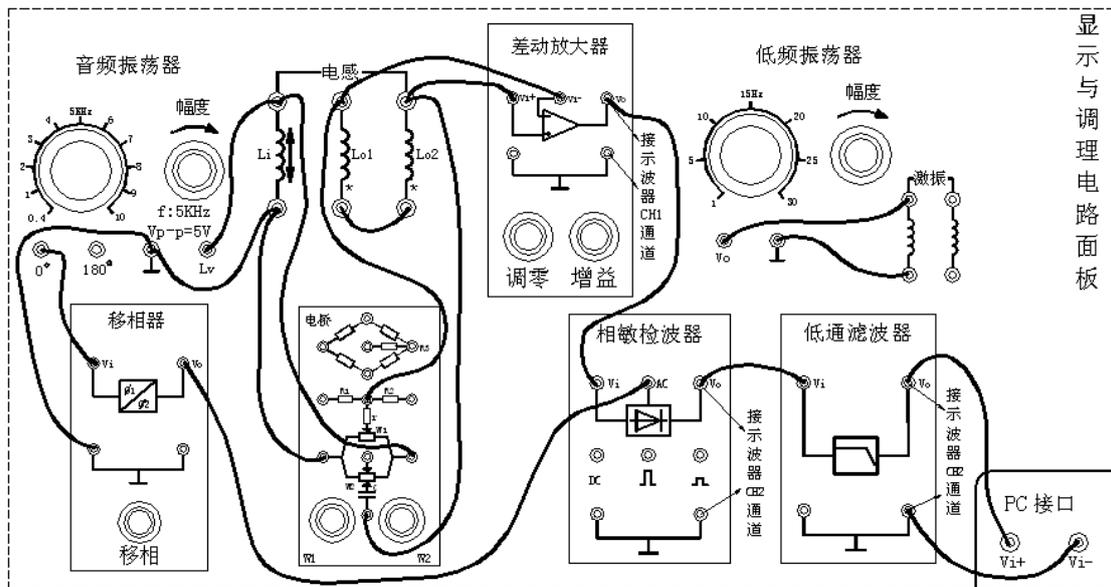


图 31 动态数据采集实验接线示意图

3、按《软件用户手册》中的“2、实验操作中的 e、动态实验：”方法并结合“实验十六差动变压器的应用—振动测量实验”进行操作实验。实验完毕，关闭所有电源。