

目 录

实验一	岩石波速的测量.....	2
实验二	地震模型实验（二层介质模型）及震相识别.....	5
实验三	超声法测量岩石的动态弹性参数.....	11
实验四	对称四极电测深法导电纸正演模拟.....	16
实验五	磁力仪格值的测定.....	24
实验六	用磁称法测岩石磁参数.....	28
实验七	地磁静日变化 S_q 的谐波分析.....	33
实验八	岩石基本参数密度的测定.....	40
实验九	岩石孔隙度的测定.....	43
实验十	岩石压缩实验.....	45
实验十一	压缩时岩石弹性常数的测定.....	49
实验十二	频谱振幅比法测岩石中波的衰减.....	53
实验十三	试验机刚度的测量.....	57
仪器一	声波岩石参数测定仪.....	65
仪器二	LZSD-C 型直流数字电测仪.....	82
仪器三	液压式压力试验机.....	86
仪器四	电阻应变仪.....	91
仪器五	压电换能器.....	97
仪器六	应变片式传感器.....	103
实验误差分析及数据处理.....		110
应变测量中的误差分析.....		126
附 录.....		131

实验一 岩石波速的测量

（一）实验目的：

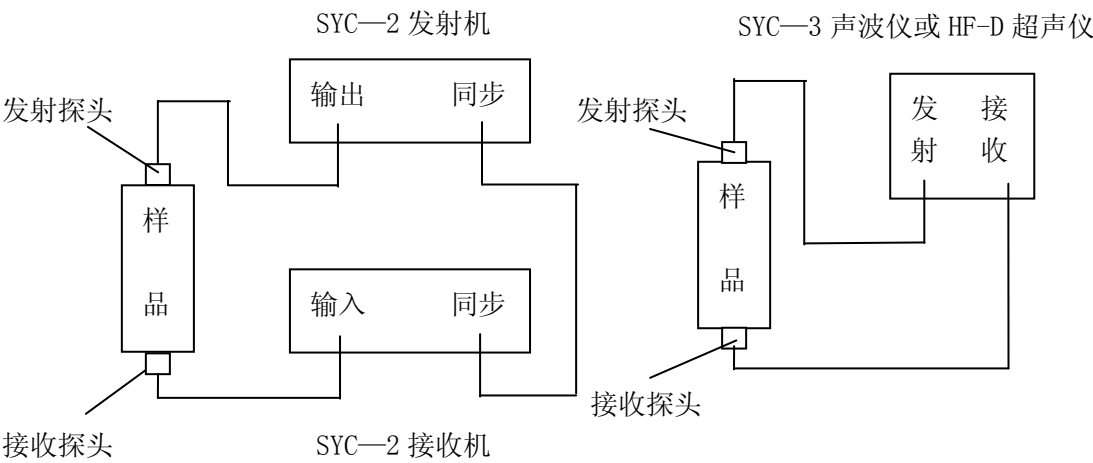
室内岩石样品的测量是野外现场测定地质解释的基础。熟练使用声波仪，掌握波速测量的方法，学会正确识别纵波及横波。

（二）设备：

- 1. **SYC-3**型超声岩石参数测定仪或**HF-D**超声仪
- 2. 超声探头一对（发射、接收各一个）
- 3. 游标卡尺
- 4. 耦合剂（凡士林或黄油、真空脂）
- 5. 铝铂或聚碳酸脂（用于横波探头耦合）
- 6. 标本测试架。

（三）原理及装置：

大多数岩石，都服从基于线性理论的虎克定律，即小的形变与所施加的载荷成正比。在岩石介质中，超声波的传播遵循弹性波动方程。从而可得到两部分，无旋波和等体积波即纵波（P波）和横波（S波）。超声波实质上就是质点振动在介质中传播的过程。如何产生振动，我们采用压电陶瓷，用声波仪产生高频电脉冲激发压电陶瓷片，使它产生机械波即振动，这振动经探头与样品间的耦合层后，在介质中传播，到达样品的另一端时，被



图一 波速测量实验装置框图

接收探头接收，接收探头反之将此振动又转换为电脉冲信号送入声波仪中，这脉冲发射与接收间的时差由一高精度的时间测量装置测出，扣除波在探头于样品间的耦合层中的传播时间 T_0 ，即得到波在介质中的传播时间 T ，从而得到介质的波速。本实验的装置如上面图一所示。

（四）实验步骤：

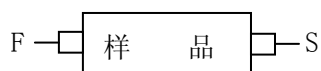
1. 选择合适的样品，将所要测量的岩石加工成园柱体，两端面加工光滑，且平行度小于 3 丝。
2. 用游标卡尺精确测量标本的长度 L 。
3. 选用合适的超声探头，为了满足无限空间的条件，所选择的超声波波长应小于岩石样品线度的十分之一；同时，若选择波长过小，以至可以与岩石中矿物颗粒的尺度相比较，则矿物颗粒的散射将突出，所以波长应同时比矿物颗粒的线度大五倍以上，即要考虑脉冲穿过岩石的距离应至少为平均粒径的十倍。

4. 测量 T_0 ：

在探头上涂上一层耦合剂，然后将探头对合，按紧，这时在声波仪上即可看到发射波形，调整时标至波形的初动，这时的时间 T_0 即为波在探头间的传播时间。

5. 测量 T_p ：

将发射探头与接收探头分别置于样品的两端，如图二，在探头与样品之间涂上耦合剂，

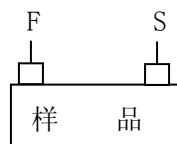


图二 波速测量探头放置示意

然后压紧。调整声波仪的时标至波形的初动，即可在声波仪的时间窗内读出超声波的传播时间 T_p 。

6. 测量 T_s ：

调整声波仪的频宽及衰减旋钮，使在示波器上能较好地辨认出横波，再将时标调至横波的起跳点上，即可在时间窗读出时间 T_s 。测量横波时也可将接收探头放置在样品的一侧，如图三（多用于方形样品），这样横波的信号可能要强一些，更便于识别，要注意这



图三 横波测量示意

时波通过的距离已不是样品的长 L ，而是样品一端至接收探头的中心的距离 L' 了。当然若使用横波探头测量时，横波更易识别，这时要注意发射及接收探头上的标记，要相对齐方可。横波测量也要改变耦合剂的使用，可用铝铂，聚碳酸脂等。

震相识别可参考实验二。

（五）实验结果处理：

计算纵波波速，将测量纵波时读出的时间 T_p 减去探头间的走时 T_0 ，才是真正的波在样品中的传播时间 T ，再根据波速公式，即可计算样品中的纵波波速：

$$T = T_p - T_0 \quad V_p = L / T$$

同理我们可以计算出横波波速 V_s 。

$$T = T_s - T_0 \quad V_s = L / T$$

编号	岩 性	样品尺寸 L (cm)	T_0 (μs)	T_p (μs)	T_s (μs)	V_p (km/s)	V_s (km/s)

（六）思考题：

1. 耦合的好坏对波速、振幅会有什么影响？
2. 对探头压力的变化对波速、振幅会有什么影响？
3. 波速的测量是否与样品的大小有关？

实验二 地震模型实验（二层介质模型）及震相识别

（一）实验目的：

熟练使用声波仪，了解简单的超声地震模型实验方法，初步掌握首波、直达纵波、直达横波及反射波等主要震相的识别；实验前必须掌握测震分析中有关的运动学及动力学特征部分及理论时距曲线等知识。

（二）设备：

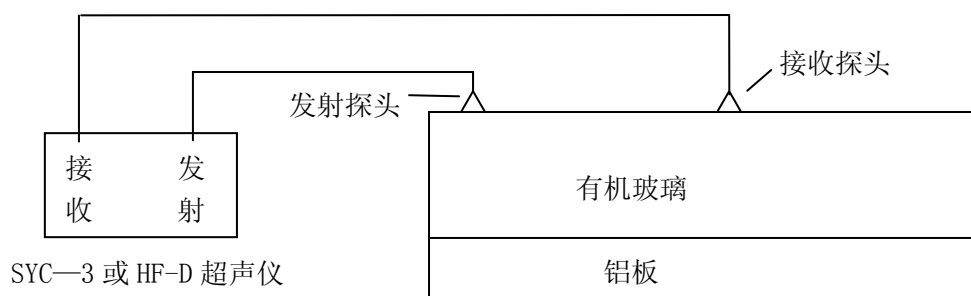
1. SYC-3型超声岩石参数测定仪或HF-D超声仪

2. 超声探头一对（发射、接收各一）
3. 耦合剂（黄油或凡士林、真空脂）
4. 有机玻璃板一块
5. 铝板一块
6. 直尺

（三）原理及装置：

该实验是利用仪器发射一变化的电压（脉冲）加在发射换能器上，产生出一简单振动波形的超声波，用超声波模拟地震波通过所研究的模型，然后被接收换能器接收后送至仪器的接收机进行放大，显示在荧光屏上，即得到了近似于天然地震的地震波的震相记录。我们实验用的超声波频率一般约为 $10^4 \sim 10^8 \text{Hz}$ 量级，一般的地震和近震的全频率约为 $1 \sim 10 \text{Hz}$ 量级，地震勘探用的频率约为 $10 \sim 100 \text{Hz}$ ，因而可以用小于实际地质构造 $10^2 \sim 10^7$ 倍的模型来研究我们的问题。

本实验的装置如图一所示：



图一 二层介质震相识别模型装置图

(四) 实验步骤:

1. 测出该实验模型有机玻璃板及铝板的大小尺寸;
2. 用波速测量实验的方法, 测出有机玻璃及铝板的波速 V_p 及 V_s ;
3. 画出理论时距曲线, 以直达波P波为例, 其延时方程为

$$t_p = \sqrt{\Delta^2 + h^2} / V_p$$

其中 h 为震源深度, 以纵坐标表示走时 t , 以横坐标表示震中距 Δ , 取几个不同的观测距离, 就可得到相应的不同的走时 t , 连接各点即画出直达 P 波的走时曲线。P 波的走时曲线为一双曲线, 在本实验中, $h = 0$, 该曲线即为一通过原点的直线。同理我们可以作出直达 S 波, 首波 P_n 、反射波 P_{11} 、 S_{11} 、等时距曲线。根据地震波理论它们的走时方程分别为:

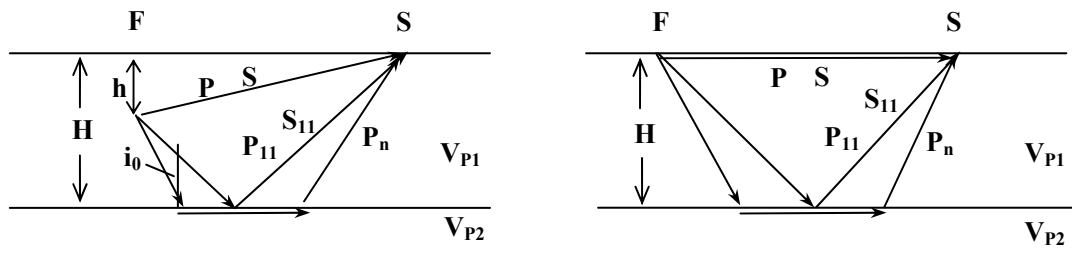
直达S波 $t_s = \sqrt{\Delta^2 + h^2} / V_{s1}$

反射P波 $t_{P_{11}} = \sqrt{\Delta^2 + (2H - h)^2} / V_{P1}$

反射S波 $t_{S_{11}} = \sqrt{\Delta^2 + (2H - h)^2} / V_{S1}$

首波 P_n $t_{P_n} = \frac{2H - h}{V_{P1}} \cos i_0 + \frac{\Delta}{V_{P2}}$

其射线如图二所示。



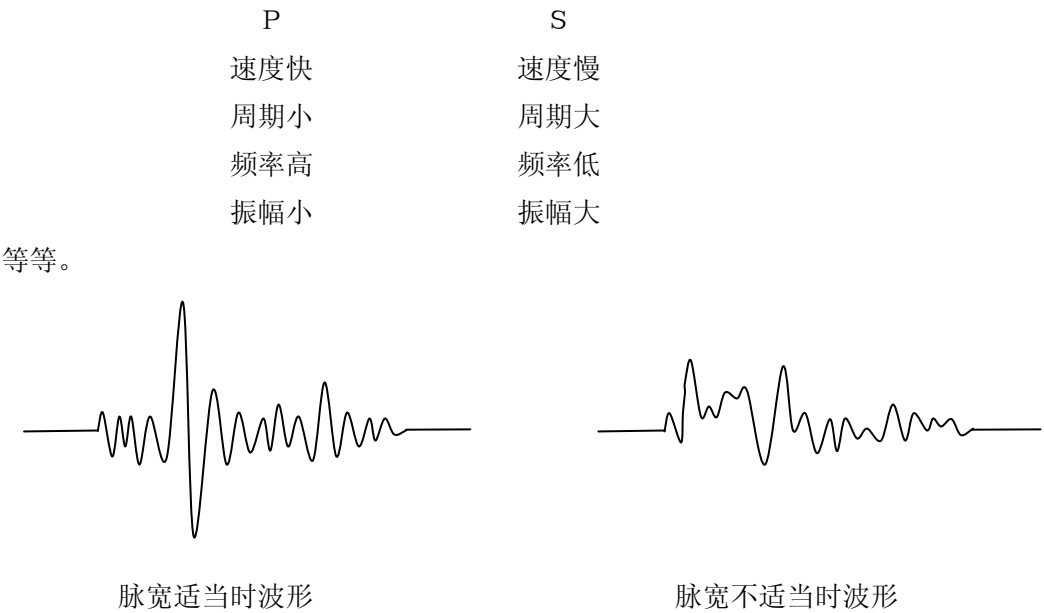
图二 二层介质波传播射线示意图

4. **模型制作**，将有机玻璃板长边及铝板的长边涂上耦合剂，然后互相耦合粘紧，不要留有空隙，组成一有机玻璃板与铝板的二层模型，将发射探头用耦合剂在模型有机玻璃的一端，如图三。



图三

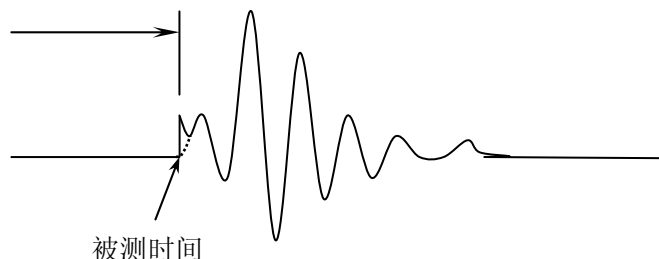
5. 在有机玻璃板的一侧，距发射探头由近到远，取不同的距离，如10cm、20cm ……，用耦合剂固定接收探头，以测得不同的走时 t 。注意每次测得的走时 t 一定要扣除两探头对接耦合时的走时 t_0 。
6. **震相识别**，震相识别是一个很复杂的问题，实验是否成功，关键在于模型的建造及震相的识别，而震相识别又在于主要震相是否简单清晰。在模型材料和尺寸都已选定的情况下，还要从换能器的组合上去考虑如何突出所需要的震相，现在换能器的组合已固定，我们即要调整仪器，并以理论时距曲线为依据，结合各种波的运动学及动力学特征对比来识别震相。如直达纵波 P 与直达横波 S 的特征对比如下：



图四 脉宽调整波形变化

(1) 调整仪器的发射脉宽，使其到最佳位置，这时发射源的辐射能量最大，反复调整，使直达P波或S波易于识别，震相振幅最大，而且波形也最简单。如图四为一例。

(2) 测量P波初至到时，为了选准起始点的位置，在噪声干扰不影响测量的情况下尽量使放大器的增益加大，扫描宽度适当，使波的起始尖锐，如图五，然后把时标稳至被测震相



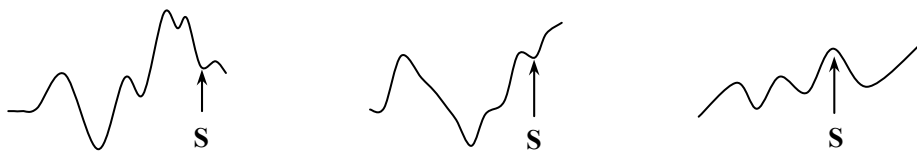
图五 初至的选取

的起跳点上，此时数码管上显示的数字，扣去 t_0 即为该震相的到时 t_p 。

(3) S波初至到时的测量比P波困难，首先为了找到S波的起始位置，把放大器的增益尽量减小，使P波的振幅几乎小到与水平基线重合，从而使S波的振幅突出，并参考时距曲线，大体上找到S波的起始，然后再加大增益细找S波的起始点，一般情况下在S波大振幅前面，去找周期、振幅、相位与P波列不同，而属S波初至的震相。适当时可调整一下发射脉冲宽度，波形会发生变化，但S波初至是不会改变的，以帮助进一步确认S波的初至波形。

P波比较易于识别，我们可利用波速比大至确定S波的范围，一般完整岩石，其泊松比 $\nu \approx 0.25$ ，则波速比 $V_p/V_s = t_s/t_p \approx 1.73$ ，可初略判定S波震相，各种介质的波速比是不一的，在我们模型中有机玻璃的波速比约为 1.89 。

有时特别是震中距较小时，S波初至是在被追踪的震相附近的大波峰或波谷中出现一些阶梯状的小拐弯（拐点），根据经验，一般在靠近水平基线附近的拐点上，S波震相的几率最大。如图六。



图六 S波初至的识别

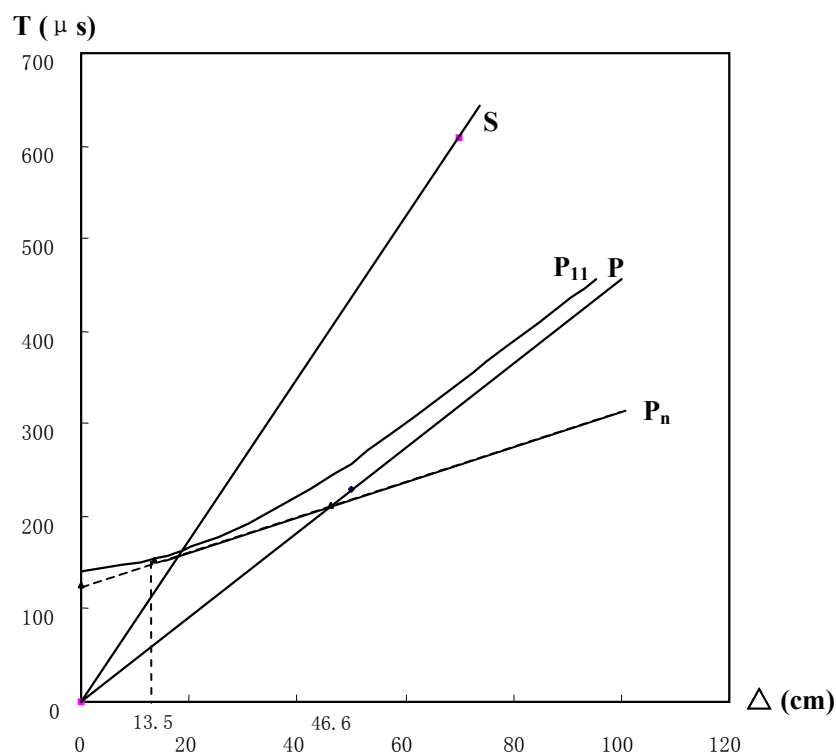
(4) 反射波, 首波(折射波)一般来讲比直达波难于辨认, 因它们常混于P波和S波的波列中。其震相基本特性和识别方法可归纳为以下几点: ①波在介质中传播时, 遇到界面会产生反射, 折射和转换等现象。一般情况下, 反射波的初至到时比直达波晚。 P_{11} 周期大于P, 小于S; S_{11} 的周期大于或等于S波。②反射波的相位决定于反射系数, 如有机玻璃与空气间的反射系数 $i < 0$, 得直达波P与反射波 P_{11} 的初动反相, 而有机玻璃与铝板间的反射系数 $i > 0$, 则得直达波P与反射波 P_{11} 初动为同相。 P_{11} 的周期小于S波的周期。当距离比较远时, 即震中距 Δ 比较大时, 我们可压缩波形, 根据波列的包络线可大至的确定反射波的位置。③首波 P_n 的周期大于P波, 其振幅很小, 相位与P波初至一致。当其混于P波列时, 不易识别, 当震中距大于盲区(Δ_0)后, 首波逐渐超前于直达波, 其波列近似于正弦波形, 成为最先到达接收点的震相, 此时首波容易识别。

(五) 实验结果处理:

首先根据测得的有机玻璃的 V_{P1} 和 V_{S1} 及铝板的 V_{P2} , 由公式计算画出各个波的理论时距曲线, 其纵坐标为走时 t , 横坐标为震中距 Δ 。

根据公式计算出 t_P 、 t_S 、 t_{P11} 和 t_{Pn} , 然后画出纵波(P)、横波(S)、反射波(P_{11})和首波(P_n)的理论时距曲线。

P_n 波在46.4cm处超前P波出现



图七 理论时距曲线

其中:

有机玻璃 $V_{P1}=2200\text{M/S}=0.22\text{cm}/\mu\text{s}$

$V_{S1}=1165\text{M/S}=0.1165\text{cm}/\mu\text{s}$

铝板 $V_{P2}=5357\text{M/S}=0.5357\text{cm}/\mu\text{s}$

$V_{S2}=3025\text{M/S}=0.3025\text{cm}/\mu\text{s}$

$H=15\text{cm}$

在二层介质模型上按不同的震中距，测量P波、S波、 P_{11} 波及 P_n 波的到时，在坐标中点出不同震中距上各震相的走时 t ，其纵坐标为走时 t ，横坐标为震中距 Δ ，连接各点作出实验测得的P波、S波、 P_n 波及 P_{11} 波的时距曲线。

$\Delta(\text{cm})$ 走时	10	20	30	40	50	60	70	80
P								
S								
P_{11}								
P_n								

(六) 思考题:

1. 震相识别中存在的问题，拟如何解决？
2. 如何克服侧边反射的干扰？

实验三 超声法测量岩石的动态弹性参数

（一）实验目的：

了解岩石的动态弹性参数的测试方法以及其与静态参数的区别。

（二）设备：

1. **SYC-3**型超声岩石参数测定仪或**HF-D**超声仪
2. 超声换能器（即探头）一对
3. 游标卡尺
4. 耦合剂
5. 计算器

（三）原理及装置：

岩石的岩性、结构对于它的物理力学性质有着显著的影响，同时也决定了超声波在岩石中的传播特性，如波速、衰减及频谱等。

测量岩石的弹性性质的方法有两方面，一是静态的（或准静态），测量外静应力及形变，利用单轴压缩、扭转、拉伸等。而另一种则是研究弹性波在物质中传播的特性。超声波作用于岩石后的波动可以看作是岩石受外超声的振动作用产生了形变，我们知道弹性介质的形变分为体变与形变两种形式，所以岩石中弹性波运动就是使岩石介质产生应力与应变的结果，是属于弹性波动力学问题，我们也即可根据弹性波的运动求得岩石介质的弹性力学参数。纵波和横波的波速与岩石的弹性模量之间有着对应的数理关系，纵波反应岩石拉伸和压缩的形变，只受法向控制，表征其强度及变形特征，而横波则反应岩石的剪切形变，受剪切强度控制，因此利用法向及剪切形变特征，即可反应岩石的弹性特征，岩石的纵横波速比（ V_p / V_s ），表征岩石的完整程度，也就是其动泊松比的变化特征。因此我们可以利用超声法测出岩石的纵波波速及横波波速，以及已知岩样的密度，通过它们各弹性参数之间的关系，计算而求得各参数值。装置同岩石的波速实验。

在超声波作用下，岩石的质点运动可根据牛顿定律引出波动方程，这里我们将岩石看作均一、各向同性的弹性无限体，则有

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial X} + G \nabla^2 U$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial Y} + G \nabla^2 v \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial Z} + G \nabla^2 \omega$$

在式中 Δ 为体积应变：
$$\Delta = \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial v}{\partial Y} + \frac{\partial \omega}{\partial Z}$$

∇^2 为拉普拉斯算子：
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2}$$

ρ 为介质密度， G 为剪切模量， λ 为拉梅常数， $\lambda = K + 2G / 3$ ，其中 K 为体积模量。

将（1）式中相应的 X 、 Y 、 Z 微分，并相加则得到单纯体积膨胀或压缩变形的波动方程，也即是纵波方程：

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2G)}{\rho} \nabla^2 \cdot \Delta \quad (2)$$

根据（2）式，相应于这种形式的纵波传播速度与弹性参数的关系可建立：

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (3)$$

同样，方程（1）中，体积变形为零，则可导出单纯剪切变形的波动方程：

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \nabla^2 U \quad (4)$$

由（4）式，相应于这种形变的剪切波，即横波传播速度与弹性参数关系可建立：

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

这样我们就得到了岩石的密度 ρ 与纵波、横波速度的关系，根据 (3)、(5) 式，我们即可计算出拉梅常数 λ 和剪切模量 G 。这样进一步我们则可根据以下的公式求出介质的动弹模量 E_d 和动泊松比 μ_d 。

$$E_d = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G} \quad (6)$$

$$\mu_d = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \quad (7)$$

在实际的测量计算中 (3)、(5)、(6)、(7) 式都写为动弹参数与波速的关系。

(四) 实验步骤:

1. 同岩石的波速实验，测出岩石的纵波波速 V_p ，以及横波波速 V_s 。一般岩石标本的尺寸应大于波长的十倍左右，以满足近似无限体的物理前提。

2. 由密度实验计算出岩石的密度 ρ 。

一般完整坚硬、比重大的岩石波速高，动弹参数值较高。岩石动泊松比变化引起横波波速变化不大，而纵波波速变化较大。

3. 也可用压缩实验所得得弹性模量 E ，泊松比 ν ，以及密度 ρ 计算出岩石的纵波波速 V_p 及横波波速 V_s 。

(五) 实验结果处理:

利用已知的波速 V_p 、 V_s 及密度 ρ 与各弹性参数之间的关系计算:

$$\text{动弹模量} \quad E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (8)$$

$$\text{或} \quad E_d = \frac{V_p^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (9)$$

$$\text{动泊松比} \quad \nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (10)$$

$$\text{拉梅常数} \quad \lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \quad (11)$$

$$\text{剪切模量} \quad G = \rho V_s^2 \quad (12)$$

$$\text{体积模量} \quad K_d = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \quad (13)$$

$$\text{压缩系数} \quad \beta = \frac{1}{K} \quad (14)$$

$$\text{纵向模量} \quad K = \rho V_p^2 \quad (15)$$

附：由 E 、 ν 及 ρ 计算 V_p 、 V_s

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (16)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (17)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} = \sqrt{\frac{K}{G} + \frac{4}{3}} = \sqrt{\frac{\lambda}{G} + 2} \quad (18)$$

在工程上，如果我们能知道动弹模量与静弹模量之间的比例关系，对工作则会带来大大的方便，但目前在理论上，研究得还不够充分，只能有某些经验公式。如

$$E_s = 0.1E_d^{1.43} \quad (19)$$

但在使用上有局限性，只对某些岩石有效。一般坚硬的岩石如火成岩 E_d / E_s 较小，而较软的岩石如某些变质岩，则 E_d / E_s 较大。

岩性	岩样尺寸		纵波		横波		$\frac{V_p}{V_s}$	泊松比 ν_d	密度 ρ (g/cm ³)	动弹模量 E_d (Kg/cm ²)	剪切模量 G_d (Kg/cm ²)	体积模量 K_d (Kg/cm ²)
	长 (cm)	直径 (cm)	走时 t_p (s)	波速 V_p (M/s)	走时 t_s (s)	波速 V_s (M/s)						

附：

部分介质的弹性参数

参数 介质	杨氏模量 E	体变模量 K	切变模量 G	拉梅系数 λ	泊松比 ν	密度 ρ
	(牛顿 / 厘米 ² × 10 ⁶)					(克 / 厘米 ³)
钢	20	17	8	11	0.30	7.70
铝	7	7.5	2.5	5.5	0.35	2.70
玻 璃	7	5	3	3	0.25	~2.55
花 岗 岩	7	3	2	2.5	0.25	~2.67
石 灰 岩	5.5	3.5	2	3.5	0.20~0.32	~2.65
砂 岩	4.5	3	1.5	2.5	0.23~0.28	~2.45
页 岩	3	2	1	1	0.22~0.40	~2.35

 V_p / V_s 与介质泊松比的关系

ν	0	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
V_p / V_s	1.41	1.50	1.63	1.73	1.87	2.45	∞

(五) 思考题：

各弹性常数的物理意义如何？

实验四 对称四极电测深法导电纸正演模拟

（一）实验目的：

地电学是研究大气，海洋和固体地球内部的电性及电场分布规律，利用电法勘探中的某些方法，来研究固体地球内部介质及其周围的电性以及其电场的分布。用导电纸模拟均匀层状介质地面，采用四极对称电测深法，测量均匀层状介质地质剖面的电场分布，了解电场分布特征，用理论知识来验证实验结果。学会正演科学实验方法，导电纸可以不同的地质构造，可以代替复杂的理论计算，为反演推断，解释提供依据。本实验用导电纸模拟水平均匀层状介质地面电场分布特征。在导电纸上挖洞模拟高阻矿体，在导电纸上压金属板模拟低阻矿体，比较含有不同模拟矿体时的电场分布特征。

（二）设备：

1. 图板
2. 导电纸
3. LZSD-C型自动数字电测仪
4. 电池1—2节或直流电源
5. 大头针及小铁锤
6. 鳄鱼夹及导线
7. 特种铅笔、直尺、记录本
8. 计算器

（三）原理及装置：

导电纸（电讯传真原纸）是一种纸浆加碳黑制造的纸，其面电阻在 10^3 — 10^4 欧姆范围内，与均匀介质相当，当在纸面上以点电源或其他形式供电时，电位在场源内满足泊桑方程，在场源外满足拉普拉斯方程。

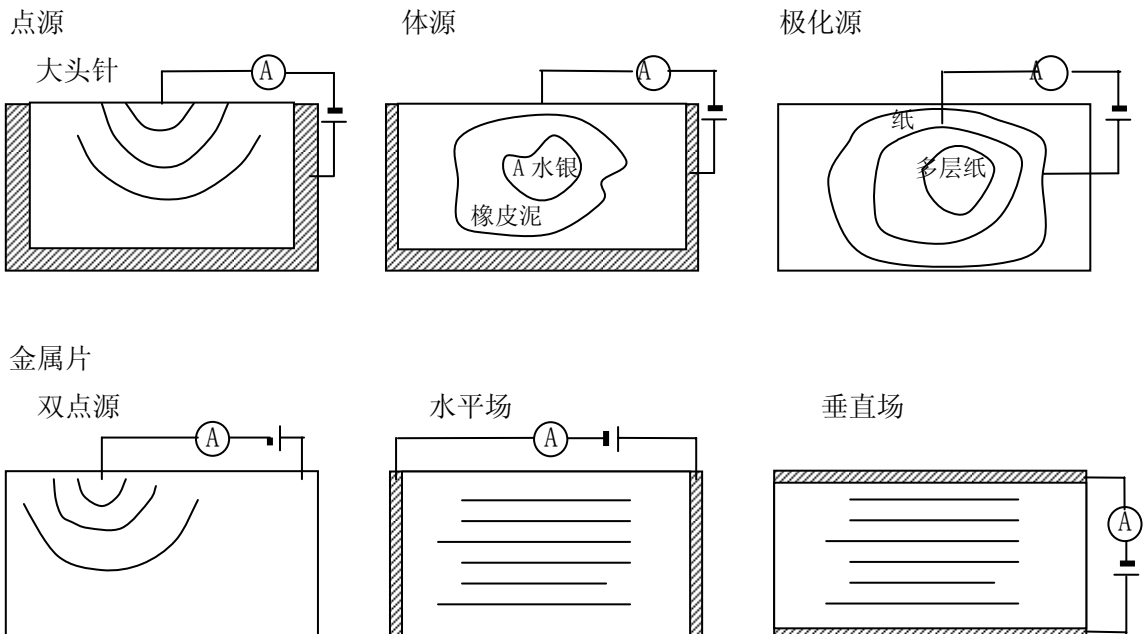
地球物理场的理论研究，无论是直流电场、磁场、重力场或激发极化场，它们同样也满足这二个方程，因此利用导电纸作为介质就可能模拟这些方法的理论计算。众所周知，复杂态理论计算的数学解不仅费时，而且有时是不可能的，而导电纸模拟实验恰能担负起这个任务。

它们之间相互的对应关系，在二维问题中可按下表一一对应。

导电纸实现类比的形式：

场的名称 对应关系	直流电场	磁 场	引力场	激发极化 总合场	导电纸
源内位方程	$\nabla^2 \phi = I$	$\nabla^2 \phi = 4\pi\mu J$	$\nabla^2 \phi = 4\pi G$	$\nabla^2 \phi = I$	$\nabla^2 \phi = I$
源外位方程	$\nabla^2 \phi = 0$	$\nabla^2 \phi = 0$	$\nabla^2 \phi = 0$	$\nabla^2 \phi = 0$	$\nabla^2 \phi = 0$
边界条件	$\sigma_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \sigma_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}$ $(\phi_1)_{Z=h_1} = (\phi_2)_{Z=h_1}$	$\mu_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \mu_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}$ $(\phi_1)_{Z=h_1} = (\phi_2)_{Z=h_1}$	$(\phi_1)_{Z=h_1} = (\phi_2)_{Z=h_1}$	$\sigma_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \sigma_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}$ $(\phi_1)_{Z=h_1} = (\phi_2)_{Z=h_1}$	$\sigma_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \sigma_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}$ $(\phi_1)_{Z=h_1} = (\phi_2)_{Z=h_1}$
位势对应关系	电位 ϕ	磁位 ϕ	引力位 ϕ	总极化电位 ϕ	导电纸电位 ϕ
增强对应关系	E_{11} (水平) E (垂直)	H 2	— Δg	E_1 E_2	E E
场源对应关系	I 电流	J 极化强度	ΔM 剩余质量	I 电流	I 电流
物性参数	导电率 σ	导磁率 μ	剩余密度	等效导电率 σ	导电率 σ

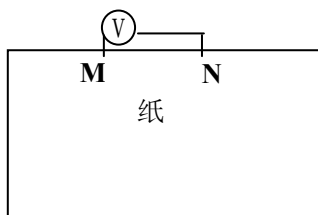
建场布置：（图中的“纸”为均匀导电纸）



测量布置：（地面）

电场：水平

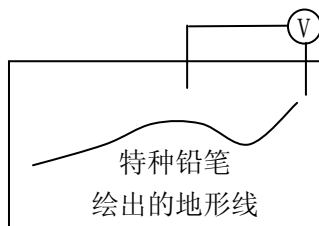
大头针



磁场

水平

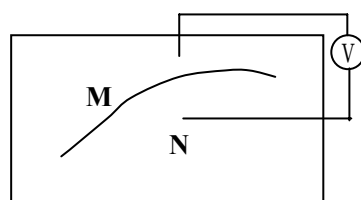
引力场



磁场

垂直

引力场



1. 模拟层参数：

三层地层的模拟曲线，采用多种形式，例如：

(1) $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ H型曲线(2) $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ Q型曲线(3) $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ K型曲线(4) $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ A型曲线

实现上述电阻率的方法是：

采用多层导电纸迭加， $\rho_{\text{迭}} = \frac{\rho_1}{n}$ ，以减小电阻率，利用纸边作为 $\rho_2 = \infty$ ，金属作为 $\rho_3 = 0$ 。

H型及A型， ρ_3 用导电纸外图板代替， $\rho_3 = \infty$ ，**H型** $\rho_1 > \rho_2$ 用n层纸迭加， ρ_1 为一层，作为测量表面，**A型** ρ_1 、 ρ_2 互换，**Q、K型**用铜或铝片代替，**Q型**曲线 ρ_1 、 ρ_2 同**H型**，**K型** ρ_1 、 ρ_2 同**A型**曲线。

2. 比例尺：

各层厚度及地面极距采用同一比例尺，一般模拟需要二种以上的比例尺，第一种用1：100，实际1米为纸上1厘米。**AB/2**可工作至40米，（即**AB**长80米，相当纸上80厘米）第二种比例尺为1：1000，纸上1厘米相当实地10米，可工作至400米，两种比例尺同样适用

於地层厚度。1:100比例尺中，导电纸宽**1cm**即代表地层厚度1米，在1:1000时则为10米。
更大的极距需用另外的比例尺，地层厚度采用二种，其中一种用以下参数：

$h_1=10$ 米， $h_2=20$ 米， $h_3 \rightarrow \infty$ ；纸上按比例尺分别量出纸宽

1:100 h_1 为纸宽**10cm** h_2 宽**20cm** h_3 为图板 $\rightarrow \infty$

1:1000 h_1 宽**1cm** h_2 宽**2cm** h_3 为图板 $\rightarrow \infty$

另一种采用， $h_1=20$ 米， $h_2=20$ 米

(四) 实验步骤：

1. 三层地层的模拟曲线

(1) 调节仪器并连接导线

(2) 布置导电纸

按模拟要求布置纸面：

1 组 A: $\rho_1 = 1/4\rho_2$; $\rho_3 = \infty$ 导电纸为 ρ_1

$h_1=10\text{cm}$; $h_2=20\text{cm}$ 1:100

B: $\rho_1 = 1/4\rho_2$; $\rho_3 = \infty$ 导电纸为 ρ_1

$h_1=1\text{cm}$; $h_2=2\text{cm}$ 1:1000

2 组 A: $\rho_1 = 1/4\rho_2$; $\rho_3 = \infty$

$h_1=20\text{cm}$; $h_2=20\text{cm}$ 1:100

B: $\rho_1 = 1/4\rho_2$; $\rho_3 = \infty$

$h_1=2\text{cm}$; $h_2=2\text{cm}$ 1:1000

层间连接可用大头针，每隔 **1cm—2cm** 钉一根。也可用浆糊粘合（需加盐类物质）。

(3) 布置地表测线，用直尺和铅笔量出距离：

在 1:100 时: $\frac{MN}{2} = 1\text{cm}$ （相当实地 1 米）

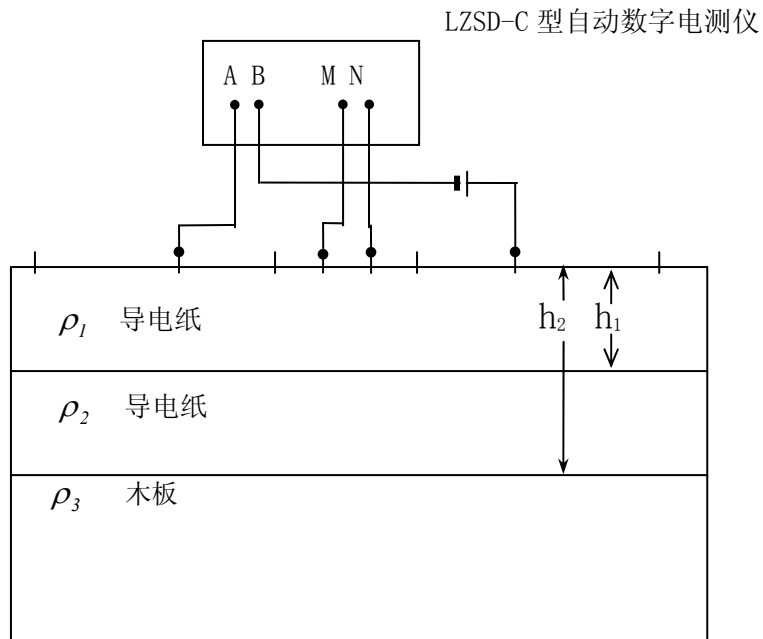
$\frac{AB}{2} = 3、4、5、6、9、12、15、25、40 \text{ cm}$

在 1 : 1000 时: $\frac{MN}{2} = 1cm$ (相当实地 10 米)

$$\frac{AB}{2} = 2.5、4、6.5、10、22.5、30、40 \text{ cm}$$

各距离上均用大头针钉上, 作为供电极及测量极。

如下图所示:



(4) 按极距从大到小逐点供电, 在固定的 **MN** 极上测量电位差。

(5) 按下列公式计算 **K** 值及 ρ_s 值:

$$K = \frac{\pi}{2 \ln \left(\frac{AN \times BM}{AM \times BN} \right)}$$

或
$$K = \frac{\pi}{4} \frac{I}{\ln \left(\frac{AN}{AM} \right)}$$

$$\rho_s = k \frac{\Delta V}{I}$$

(6) 质量检查

在测量完毕后应第二次检查观测。检查时应改变电流值，一般改变电流强度 **20%**，并换人操作，两次观测计算的 ρ_s 值，按下列公式计算相对误差 **m** 及均方相对误差 **M**：

$$m = \frac{\rho_s - \rho'_s}{(\rho_s + \rho'_s)/2} \times 100\% \leq \sqrt{N-1} \times 4\%$$

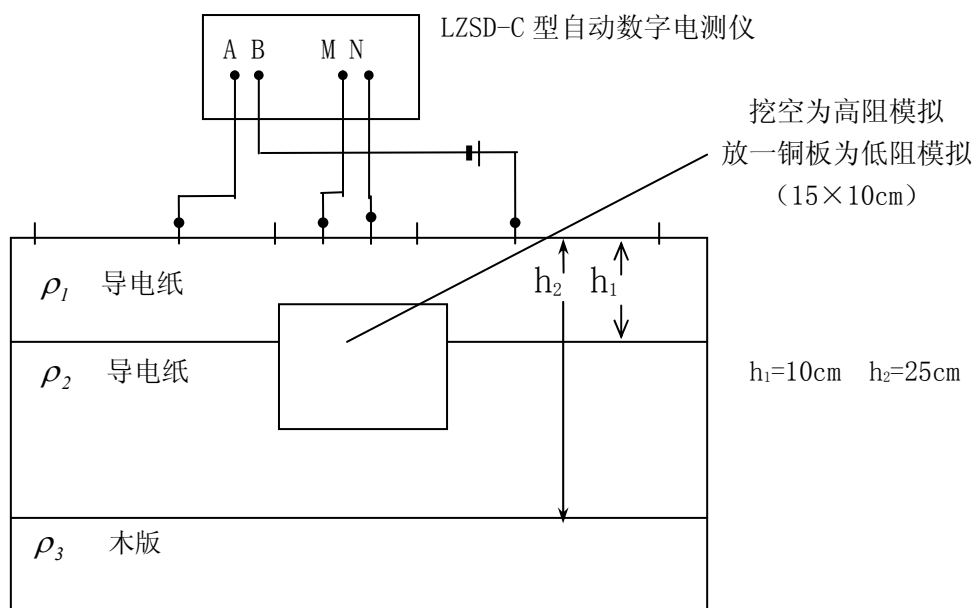
式中 **N** 为重复观测数据中参与平均的数据个数， ρ_s 为第一次观测值， ρ'_s 为检查观测值。

$$M = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n m_i^2 / 2n} \leq 5\%$$

m_i 为每个极距的相对误差，**n** 为检查的电极距数。

1. 高阻、低阻地层模拟曲线

实验步骤同 1，但只做比例尺为 1:100 的模拟布置。



(五) 实验结果处理：

模型的选择应视需要而确定，以上讨论的是三层地层曲线的模拟，也可以作更多层的模拟，方法是类同的，差别仅在于模拟的布置。

测试数据:

1 : 100

极距 (AB/2) 读 数	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm	25 cm	40 cm
ΔU_{MN} (mv)									
I (mA)									
K									
ρ_s									
ρ'_s									

1 : 1000

极距 (AB/2) 读 数	2.5 cm	4 cm	6.5 cm	10 cm	22.5 cm	30 cm	40 cm
ΔU_{MN} (mv)							
I (mA)							
K							
ρ_s							
ρ'_s							

1 : 100 (高阻)

极距 (AB/2) 读 数	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm	25 cm	40 cm
ΔU_{MN} (mv)									
I (mA)									
K									
ρ_s									
ρ'_s									

1 : 100 (低阻)

极距 (AB/2) 读 数	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm	25 cm	40 cm
ΔU_{MN} (mv)									
I (mA)									
K									
ρ_s									
ρ'_s									

各种模型模拟的结果，均需要以图件形式来表示。在双对数坐标纸上，以横坐标为 $\frac{AB}{2h_l}$ ，纵坐标为 $\frac{\rho_s}{\rho_l}$ 成图。也可作出模拟的量板册，一般情况下，导电纸模拟的结果，其精度较低，但可用作于定性的研究。

导电纸的电阻率 ρ_l 为 **0.7-1Ω/M**，电阻为 **7-10K**，为了计算方便我们电阻率取 **1Ω/M**

（六）思考题：

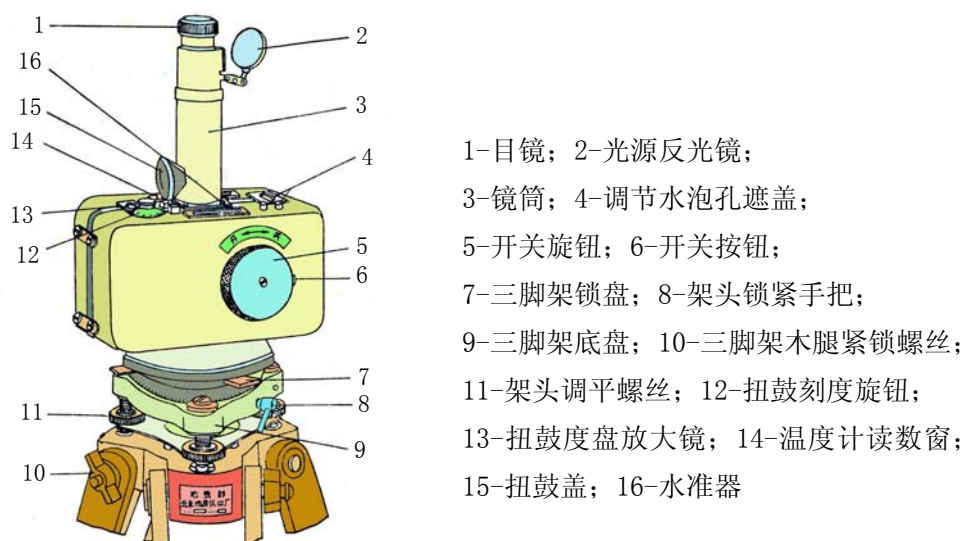
实验五 磁力仪格值的测定

（一）实验目的

1. 掌握磁力仪格值测定的原理和方法。
2. 学会磁力仪的操作过程，精确测出一台仪器的格值。

（二）设备：

1. 垂直磁力仪（刃口式或悬丝式）一台。
2. 格值仪一套。



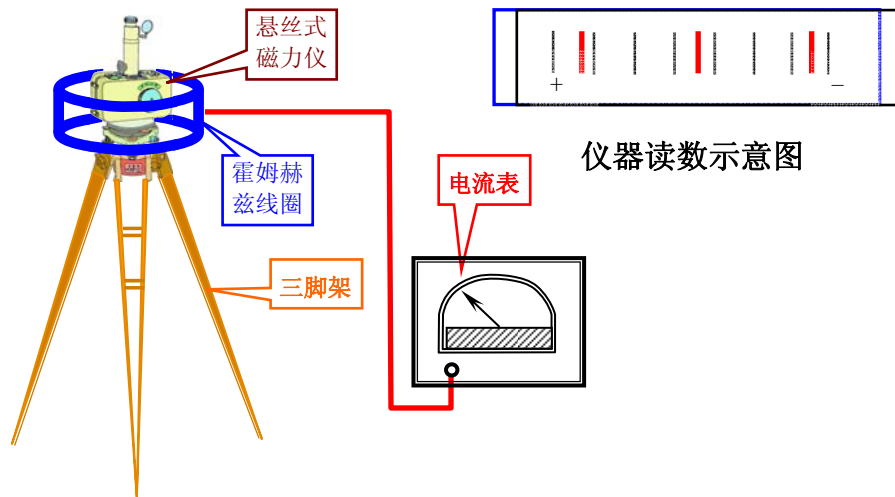
图一 悬丝式磁称外貌图

（三）原理及装置：

大家知道，外磁场的变化（ ΔH 或 ΔZ ）能引起磁力仪读数的变化（ ΔS ），若事先知道 ΔS 变化一格所相当外磁场的变化值 ε ，我们就能由 ΔS 算出 ΔH 或 ΔZ 来， $\Delta H = \varepsilon \Delta S$ ， ε 就叫作磁力仪的格值。反之，如果外磁场的变化值 ΔH 已知，则观测磁力仪读数的变化 ΔS ，便可得到格值。

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

通常， ΔH 是由赫姆霍茨线圈（即格值线圈）产生的。它由二个线圈组成，其半径 R 相同，平行放置，且间距 $d = R$ ，中心都在公轴上。二个线圈所绕的匝数相等。线圈供电



图二 装置示意图

后可在线圈中心 0 点附近产生均匀磁场。磁力仪即置于此中心进行格值的测定。装置如图二所示。

一个圆线圈在轴线上产生的磁场由下式表示：

$$H = 2\pi I \frac{R^2}{(R^2 + X^2)^{3/2}}$$

此磁场随 X 的增大而衰减(如图一, a 、 b 曲线所示), 它不是均匀磁场。

若用二个线圈组成赫氏线圈, 则在轴线上的磁场如图 1、 c 曲线所示, 它由二个线圈的磁场 a 、 b 叠加而成, 在线圈中心 $\frac{X}{R} = 0.5$ 附近 ($X=0.3 \sim 0.7$) 磁场相对变化不超过 2%, 可以近看作均匀磁场。

磁场的大小与电流成正比: $H = fI$, f 为比例系数 (即线圈常数), 它与线圈结构(半径 R , 线圈匝数 n)有关。 f 在出厂时已测定, 并标在线圈上。因此, 只要知道电流 I 就能算出赫氏线圈中心的磁场。

(四) 实验步骤

1. 安装并调好仪器

- (1). 摆好三角架, 调平水泡, 拧紧架头罗丝。
- (2). 将罗盘放在脚架上, 打开锁止器, 使磁针自由摆动, 转动架头, 使磁针指在 NS 极上, 此后, 固定架头, 锁好罗盘取下。
- (3). 将磁秤放在脚架上, 转动到不能再转动为止。这时磁系在东西方向上摆动, 水平强度

- H 对磁系无作用, 只有垂直强度 Z 起作用。
- (4). 调节脚罗丝使仪器纵横水泡准确居中.
- (5). 打开仪器开关, 观测读数。若见不到读数, 则调节仪器扭鼓 (或加上辅磁), 使活动标尺回到视野内。然后关上开关。
2. 将格值线圈套在仪器上。
3. 接通电源, 调节可变电阻 R , 使电流为 1 mA, 打开仪器开关记下读数 S_1 , 再使电流反向, 记下读数 S_2 , 二者之差为 ΔS 。
4. 改变电流, 分别测出 $I = 1、2、3$ mA 时的 ΔS , 按下式计算格值:

$$\varepsilon = \frac{2fI}{\Delta S}$$

5. 计算格值的平均值:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \quad \text{均}$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为 $I = 1、2、3$ mA 时的格值。

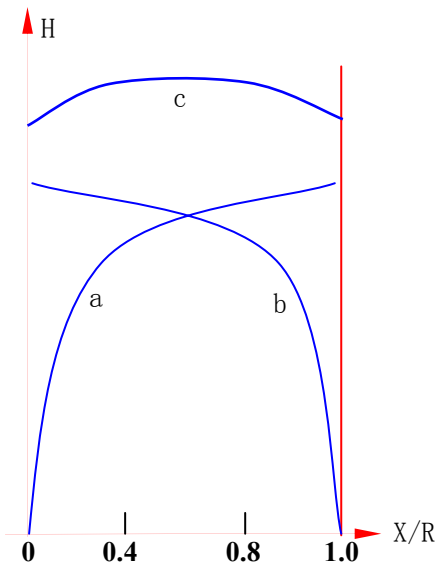
6. 计算格值测定的相对误差

$$\eta = \left| \frac{\varepsilon_i - \varepsilon'}{\varepsilon'} \right|$$

格值测定记录表:

I	S_1	S_2	ΔS	η	ε_i
1					
2					
3					
ε'					

若 $\eta < 1\%$, 测定为合格, 否则, 检查电流值、仪器读数和计算是否准确, 重新测



图三 赫氏线圈的磁场

定。

（五）思考题

1. 怎样使格值的相对误差 $\eta < 1\%$ ，有哪些影响因素？
2. 格值的测定过程中应注意哪些事情？

实验六 用磁称法测岩石磁参数

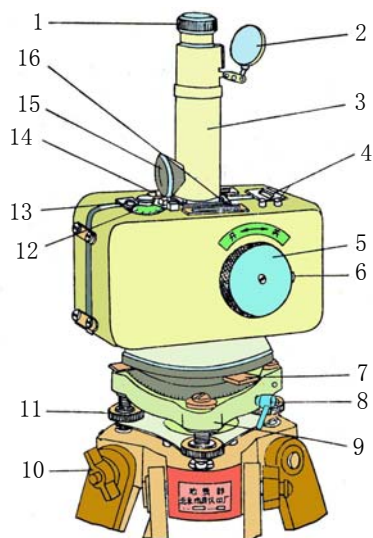
（一）实验目的：

了解用磁称法测岩石磁参数的方法、步骤，熟悉磁参数的资料整理。

（二）设备：

1. 悬丝式磁力仪
2. 磁称角架
3. 铝板
4. 标本盒
5. 钢尺

（三）原理及装置：



- 1-目镜；2-光源反光镜；
- 3-镜筒；4-调节水泡孔遮盖；
- 5-开关旋钮；6-开关按钮；
- 7-三脚架锁盘；8-架头锁紧手把；
- 9-三脚架底盘；10-三脚架木腿紧锁螺丝；
- 11-架头调平螺丝；12-扭鼓刻度旋钮；
- 13-扭鼓度盘放大镜；14-温度计读数窗；
- 15-扭鼓盖；16-水准器

图一 悬丝式磁称外貌图

利用磁称法采用高斯第二位置测标本，计算公式如下：

$$K'_I = \frac{\varepsilon \left(n_0 - \frac{n_1 + n_2}{2} \right) \times R^3 \cdot 10}{VZ_0} \times 10^{-6} \quad (C \cdot G \cdot S \cdot M)$$

$$K'_2 = \frac{\varepsilon \left(n_0 - \frac{n_3 + n_4}{2} \right) \times R^3 \cdot 10}{VZ_0} \times 10^{-6} \quad (C \cdot G \cdot S \cdot M)$$

$$K'_3 = \frac{\varepsilon \left(n_0 - \frac{n_5 + n_6}{2} \right) \times R^3 \cdot 10}{VZ_0} \times 10^{-6} \quad (C \cdot G \cdot S \cdot M)$$

$$\bar{K}' = \frac{1}{3}(K'_1 + K'_2 + K'_3)$$

$$J_{rx} = \frac{\varepsilon \left(\frac{n_2 - n_1}{2} \right) R^3 \cdot 10}{V} \times 10^{-6} \quad (C \cdot G \cdot S \cdot M)$$

$$J_{ry} = \frac{\varepsilon \left(\frac{n_4 - n_3}{2} \right) R^3 \cdot 10}{V} \times 10^{-6} \quad (C \cdot G \cdot S \cdot M)$$

$$J_{rz} = \frac{\varepsilon \left(\frac{n_6 - n_5}{2} \right) R^3 \cdot 10}{V} \times 10^{-6} \quad (C \cdot G \cdot S \cdot M)$$

$$J_r = \sqrt{J_{rx}^2 + J_{ry}^2 + J_{rz}^2}$$

$$\phi = \arctg \frac{J_{ry}}{J_{rx}} = \arctg \frac{n_4 - n_3}{n_2 - n_1}$$

$$\theta = \arctg \frac{J_{rz}}{\sqrt{J_{rx}^2 + J_{ry}^2}} = \arctg \frac{n_6 - n_5}{\sqrt{(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2}}$$

$$K = \frac{\bar{K}'}{1 - N\bar{K}'} = \frac{\bar{K}'}{1 - \frac{4}{3}\pi\bar{K}'}$$

N 为消磁系数

ε 仪器格值

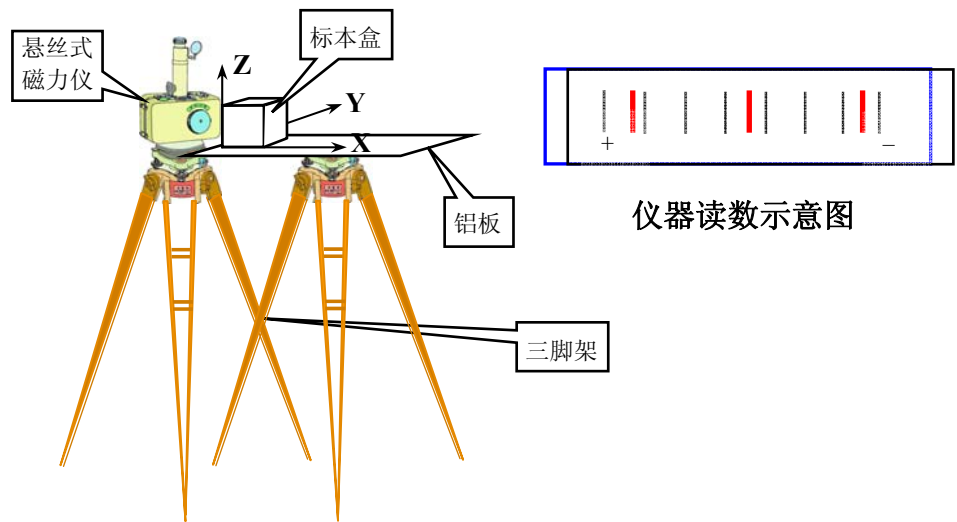
ϕ 磁偏角

R 磁系中心到标本中心的距离

Z 地磁绝对磁场值

θ 磁倾角

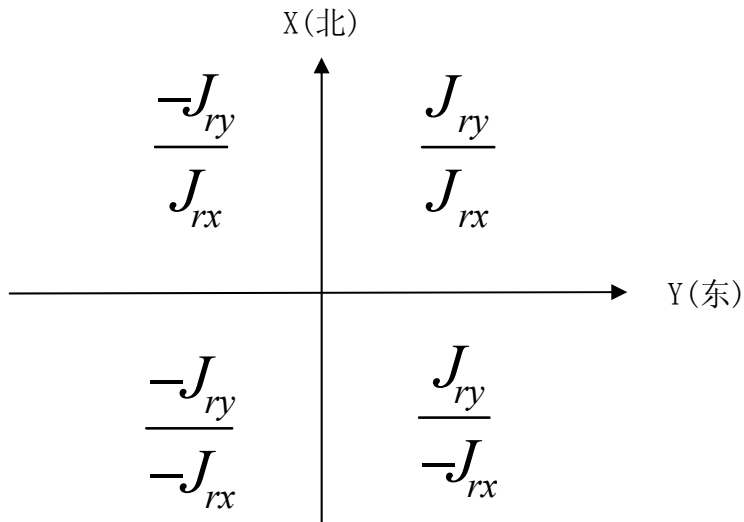
$J_{r(xyz)}$	感应磁化强度	J_r	剩余磁化强度
K	磁化率	K'	视磁化率
n_0	未放标本前磁称读数	n_i	放标本后磁称读数
V	标本体积。		



图二 岩石磁参数测定装置示意图

(四) 实验步骤及数据处理:

1. 架好磁称，使磁系摆动面在东西方向。
2. 将磁称另一角架架在磁系北极的旁边，其高度根据标本盒的大小而定（保持磁系中心与标本盒中心在同一水平面上），装上铝板并加固。根据标本磁性强弱将标本盒放在铝板的适当位置，用钢尺量好距离 R ，用笔将标本盒的位置标在铝板上。
3. 放标本时，将标本的北方与标本盒的 X 轴平行，并将标本放成实地的自然位置，切置于标本盒的中心，其缝隙用废纸塞紧，使标本在盒内不晃动。
4. 放标本前，读 n_0
5. 正式读数，将标本盒的 X 轴向下读得 n_1 ， X 轴向上读得 n_2 。以类似的方法读得 Y 、 Z 轴得 n_3 、 n_4 、 n_5 、 n_6 ，然后将数据记入磁参数测定记录计算表中。
6. 标本拿走后再读一次 n_0 。
7. 取出已测标本，用细绳捆住，先在盛水的面盆中将其渗湿，然后将它放入盛满水的量筒中，此时被排开水的体积既是标本的体积 V 。
8. 根据计算结果确定磁偏角 ϕ 的象限。



9. 根据感应磁化强度的垂直分量 J_{rz} 的正负号确定磁偏角 ϕ

当 J_{rz} 为正时, J_r 指向下;

当 J_{rz} 为负时, J_r 指向上。

实验要求:

1. 距离 R 量准到 0.2 cm, 体积量准到 5ml, 仪器读准到 0.1 格。
2. 观测过程中, 磁系不用夹固, 不用转向, 但周围磁性干扰物体不能移动, 排除磁系受震动的因数。
3. n_0 在同一块标本测定期间应不变。
4. 结果应满足: $\frac{n_1 + n_2}{2}, \frac{n_3 + n_4}{2}, \frac{n_5 + n_6}{2} \leq n_0$
5. 测定精度, 相对误差不超过 20%。

磁参数测定记录计算表（磁称法第二位置）

日期：_____

当地地磁场垂直强度： $Z_0 = 39000nT$

仪器型号：_____

仪 器 格 值： $\varepsilon = 4.25nT / \text{格}$ 岩石名称：_____ 体积 $V=1090(\text{cm}^3)$ 中心距 $R=15\text{cm}$ 零读 n_0 ：_____

读 数 n_i 平 均	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
$N_j = n_0 - \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \quad i = 1, 3, 5 \quad j = 1, 2, 3$				N_1	N_2	N_3
$N_{r(x,y,z)} = \frac{n_{i+1} - n_i}{2} \quad i = 1, 3, 5$				N_{rx}	N_{ry}	N_{rz}
$K'_i = N_j \times A \quad i = 1, 3, 5 \quad A = \frac{\varepsilon R^3 \times 10^{-5}}{VZ_0}$				K'_1	K'_2	K'_3
$J_{r(xyz)} = N_{r(x,y,z)} \times B \quad B = \frac{\varepsilon R^3 \times 10^{-5}}{V}$				J_{rx}	J_{ry}	J_{rz}
$J_r = \sqrt{J_{rx}^2 + J_{ry}^2 + J_{rz}^2}$						
$\phi = \arctg \frac{J_{ry}}{J_{rx}} = \arctg \frac{n_4 - n_3}{n_2 - n_1}$						
$\theta = \arctg \frac{J_{rz}}{\sqrt{J_{rx}^2 + J_{ry}^2}} = \arctg \frac{n_6 - n_5}{\sqrt{(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2}}$						
$K = \frac{\overline{K'}}{1 - N\overline{K'}} = \frac{\overline{K'}}{1 - \frac{4}{3}\pi\overline{K'}}$						

实验七 地磁静日变化 S_q 的谐波分析

(一) 实验目的与要求

1. 掌握谐波分析的原理和方法。
2. 通过谐波分析方法，了解地磁静日变化 S_q 的特性。
3. 绘出 S_q 的计算曲线并与观测曲线进行对比分析，讨论它们吻合的程度。

(二) 谐波分析原理

S_q 变化具有确定的周期而无正弦型的形态，即 S_q 变化是由各种周期的简单正弦型变化叠加而成，这些谐波成分可采用适当的数学方法从 S_q 中分解出来，这种方法称为谐波分析。

由于 S_q 变化是以 ($T=24$ 小时) 2π 为周期的周期性变化，故可在 $[0, 2\pi]$ 区间上展为付氏级数形式。 S_q 变化的垂直分量可表为付氏级数

$$Z(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos mt + b_m \sin mt)$$

$$\text{其中: } a_m = \frac{1}{\pi} + \int_0^{2\pi} Z(t) \cos mt dt$$

$$b_m = \frac{1}{\pi} + \int_0^{2\pi} Z(t) \sin mt dt$$

a_m 、 b_m 称为谐波系数， $Z(t)$ 为垂直分量的时均值，故可通过求 a_m 、 b_m 来求得 $Z(t)$

$$\text{当 } m=0 \text{ 时, } a_0 = \frac{1}{\pi} + \int_0^{2\pi} Z(t) dt$$

$$b_0 = 0$$

$a/2$ 是 $Z(t)$ 在 $T = 2\pi$ 周期内的平均值，用 $\delta z(t)$ 表示 $Z(t)$ 相对平均值 $a/2$ 的变化部分，则：

$$\delta Z(t) = Z(t) - \frac{a_0}{2} = \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos mt + b_m \sin mt) \quad (1)$$

利用求和的方法将(1)式中的 a_m 和 b_m 求出，然后再算出垂直分量的变化部分 $\delta z(t)$ 。

把 $[0, 2\pi]$ 区间按一定的时间间隔 Δt 分成 n 等分，即 $\Delta t = 2\pi/n$ ，并在各个时

段 Δt 中量出垂直强度 $Z(t)$ 的每个观测值 $Z_i(t)$ ，再利用“矩形公式”来求出 a_m 和 b_m 来。

$$a_m = \frac{2}{n} + \sum_{i=1}^n Z_i(t) \cos mt_i, \quad b_m = \frac{2}{n} + \sum_{i=1}^n Z_i(t) \sin mt_i \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

现在取 $\Delta t = 15^\circ$ (即一小时)， $n = 24$ ，则有：

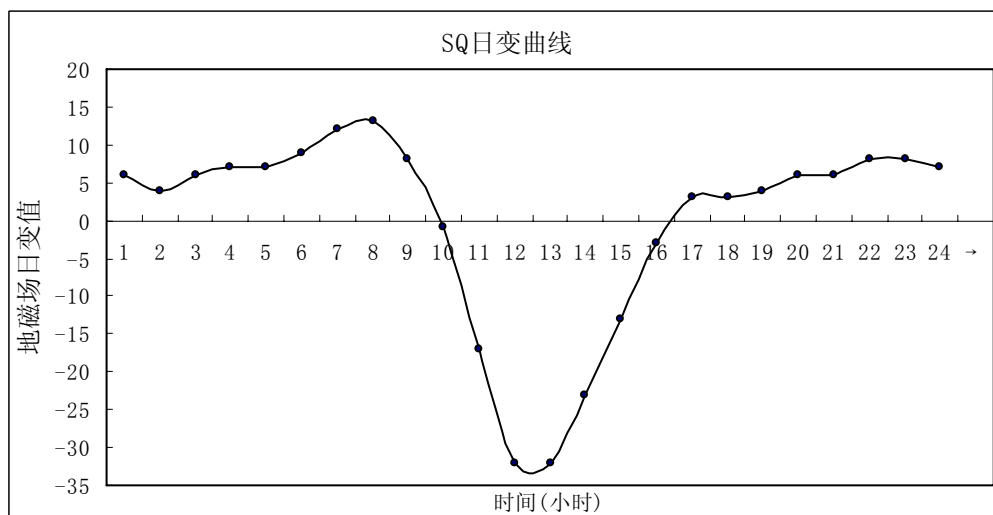
$$\delta Z(t) = \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos mt + b_m \sin mt)$$

$$a_m = \frac{1}{12} + \sum_{i=1}^{24} Z_i(t) \cos mt_i \quad b_m = \frac{1}{12} + \sum_{i=1}^{24} Z_i(t) \sin mt_i \quad (2)$$

$$t_i = (2i-1)7.5^\circ \quad i = 1, 2, 3, \dots, 24$$

(三) 实验内容

利用佘山台 1972 年 10 月 25 日垂直强度时均值资料 (见日变曲线) 取 $m = 1, 2, 3, \dots$ 求出谐波系数 a_m 、 b_m ，并由 a_m 、 b_m 分别取 $m = 1, 2$ ； $m = 1, 2, 3$ ； $m = 1, 2, 3, 4$ ； $m = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ 按公式 (2) 计算日变曲线 $\delta_1 Z_i(t)$ 、 $\delta_2 Z_i(t)$ 、 $\delta_3 Z_i(t)$ 、 $\delta_4 Z_i(t), \dots$ 。然后将这些曲线绘制成图，再将实测曲线 $Z_i(t)$ 也绘制到同一坐标系中去。然后再对实测曲线 $Z_i(t)$ 和计算曲线 $\delta_j Z_i(t)$ 进行比较分析，指出哪些谐波项是主要项？静日变化 S_q 中有哪些主要谐波项？这些谐波项在地磁日变化中有何意义？



1972 年 10 月 25 日佘山台垂直强度 S_q 日变曲线图

(四) 实验步骤

1. 先求出垂直强度 S_q 日变曲线的时均值的变化值, 即

$$\Delta Z_i(t) = Z_i(t) - 75 \quad Z_i(t) \text{ 是日均值。}$$

时 序 (i)	1	2	3	4	5	6	7	8
时 间 (Ti°)	7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5	97.5	112.5
日均值 Zi=34108+...	81	79	81	82	82	84	87	88
Zi(平均)=75 ΔZi	6	4	6	7	7	9	12	13

时 序 (i)	9	10	11	12	13	14	15	16
时 间 (Ti°)	127.5	132.5	147.5	172.5	187.5	202.5	217.5	232.5
日均值 Zi=34108+...	83	74	58	43	43	52	52	72
Zi(平均)=75 ΔZi	8	-1	-17	-32	-32	-23	-23	-3

时 序 (i)	17	18	19	20	21	22	23	24
时 间 (Ti°)	247.5	262.5	277.5	292.5	307.5	322.5	337.5	352.5
日均值 Zi=34108+...	78	78	79	81	81	83	83	82
Zi(平均)=75 ΔZi	3	3	4	6	6	8	8	7

2. 由公式 (2) 求出 a_m 和 b_m 。

3. 再由公式

$$\delta_j Z_i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos mt + b_m \sin mt)$$

或

$$\delta_j Z_i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} (A_m \cos mt_i + \phi_m)$$

$$\text{其中: } A_m = (a_m^2 + b_m^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\tan \phi_m = a_m / b_m$$

- (1) 先求出谐波项的振幅 A_m 和位相 ϕ_m 填入下表

谐波 系数	m				
	1	2	3	4	
a_m					
b_m					
A_m					
ϕ_m					

(2) 然后再求出 $m = 1, 2; m = 1, 2, 3; m = 1, 2, 3, 4 \dots\dots$ 时的每一个 $\delta_j Z_i(t)$

即：

$$\delta_1 Z_i(t) = a_1 \cos t_i + b_1 \sin t_i + a_2 \cos t_i + b_2 \sin t_i$$

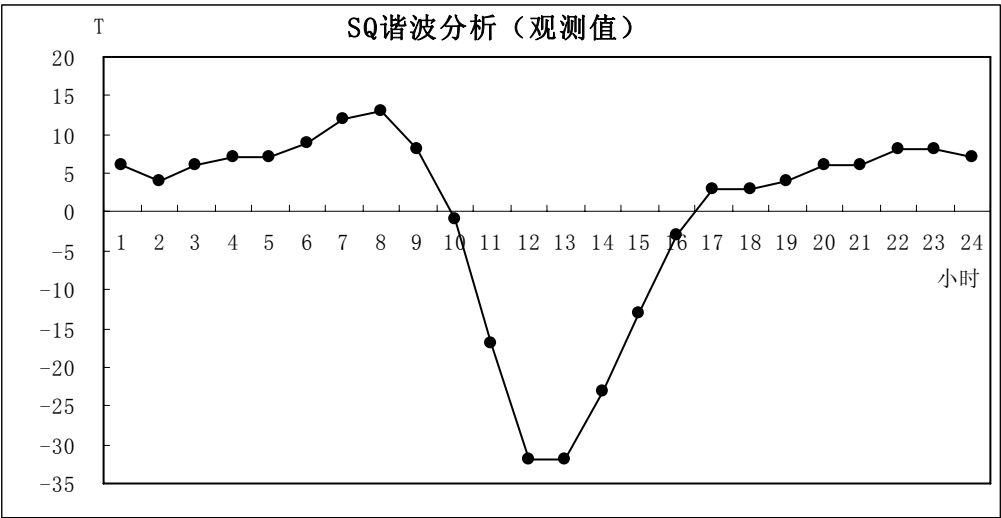
$$\delta_2 Z_i(t) = \delta_1 Z_i(t) + a_3 \cos t_i + b_3 \sin t_i$$

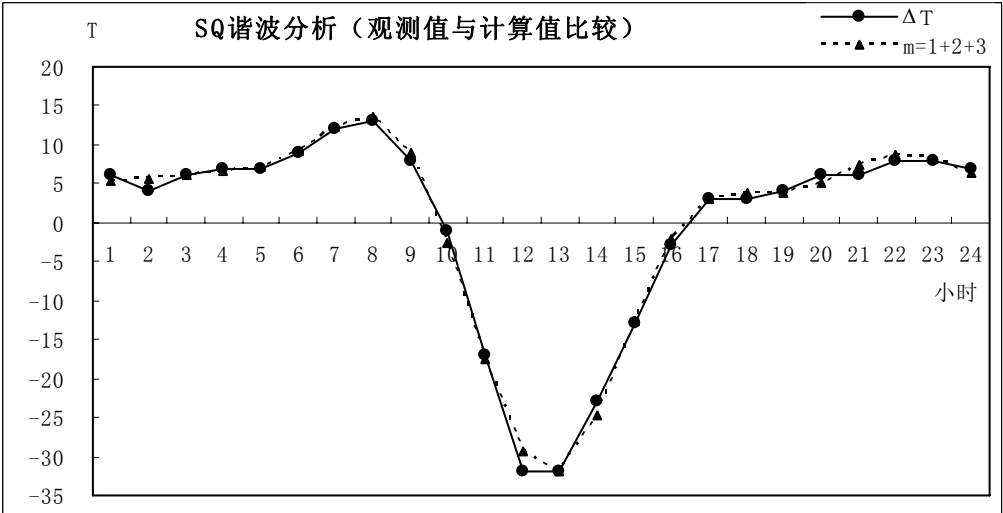
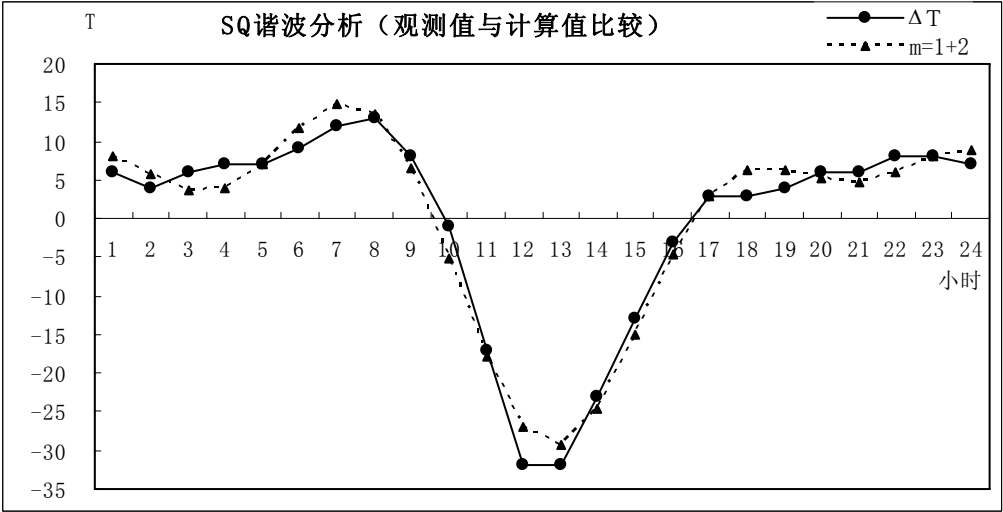
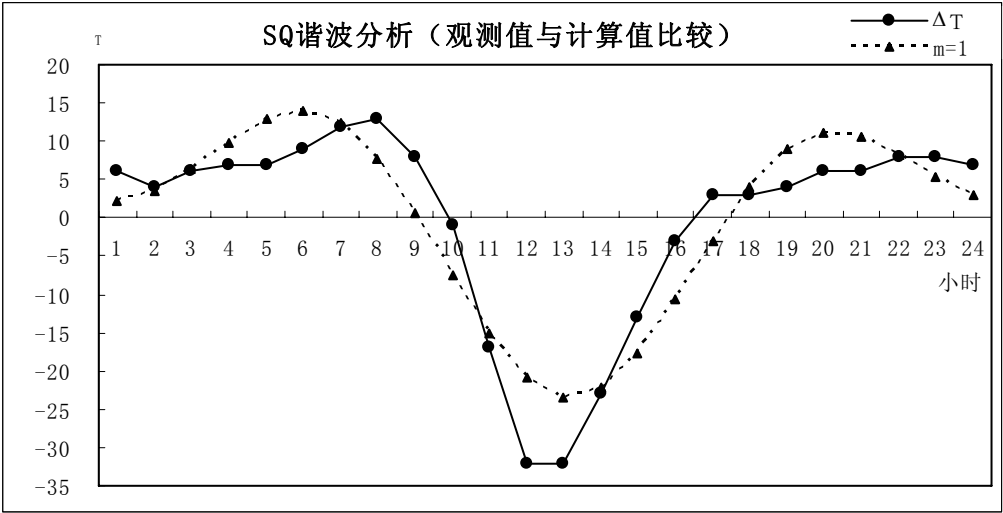
$$\delta_3 Z_i(t) = \delta_2 Z_i(t) + a_4 \cos t_i + b_4 \sin t_i$$

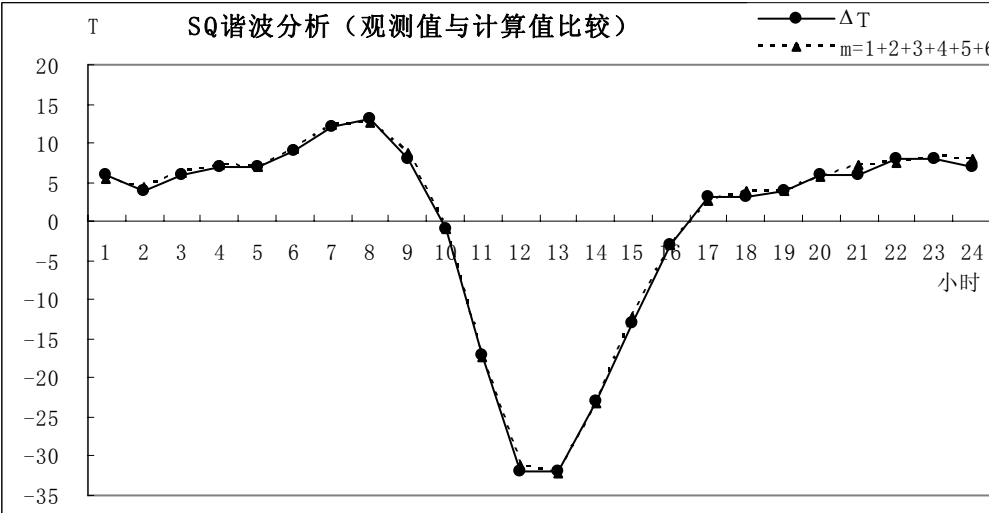
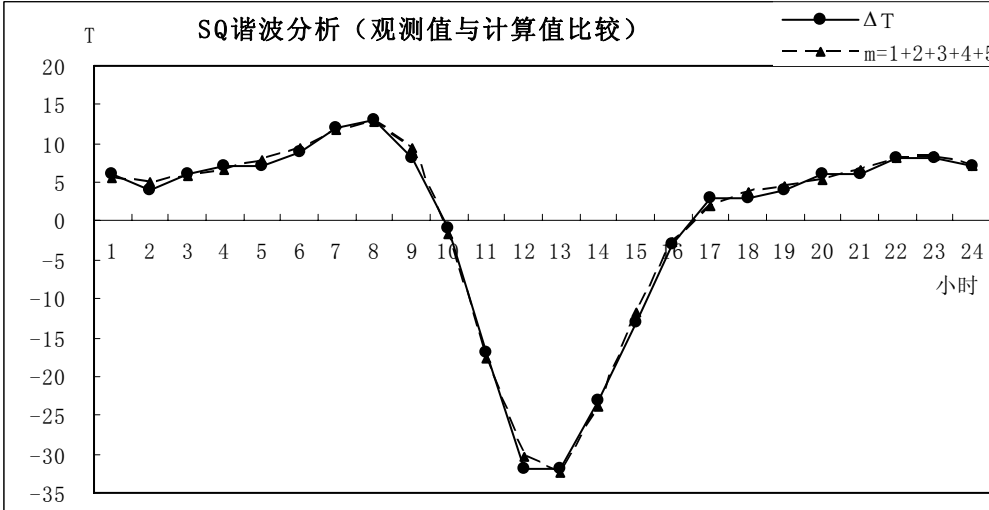
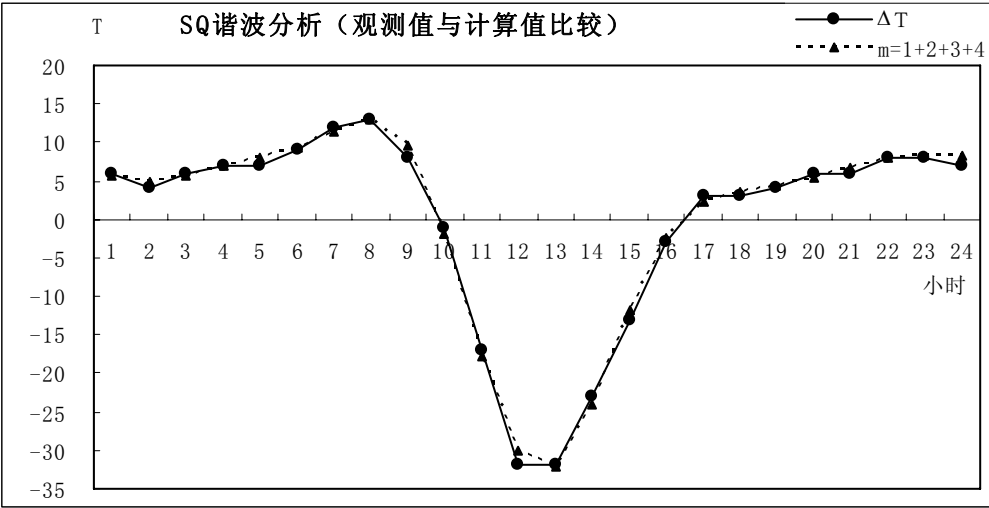
$\dots\dots$

$i = 1, 2, 3, 4 \dots 24$

然后将计算曲线 $\delta_j z_i(t)$ 绘制在图上







4. 计算工具

要求编程，作出界面，并计算出结果。

（五）计算结果的分析讨论

1. 先把观测曲线与计算对比看看复合的程度，它们之间的差值是否与 m 的取值有关？这说明什么？是否 m 取值越大与实测值越符合？

* 它们之间的差值是否与 m 的取值有关， m 取值越大与实测值越符合。

2. 根据谐波的振幅 A_m 的值确定哪些谐波项占太阳日变化的主要成份？

* 根据谐波的振幅 A_m 的值可知： $m = 1, 2, 3, 4$ 谐波项占太阳日变化的主要成份，

因为它们分别是全日波、半日波、 $\frac{1}{4}$ 和 $\frac{1}{8}$ 日波。

3. 算出每个谐波的位相。

4. 根据你的分析结果得到什么结论？请你详细地写入你的实验报告。

* 根据以上分析结果得到：太阳静日变化 S_q 是由不同的谐波组成，其中，全日波、

半日波、 $\frac{1}{4}$ 和 $\frac{1}{8}$ 日波占主要成分。

（六）思考题

1. 太阳静日变化 S_q 主要有哪些谐波成份组成？除了本方法外，你是否可用别的方法对 S_q 进行分析？

2. 太阳静日变化 S_q 谐波分析结果在地磁学的变化磁场中有何作用？

实验八 岩石基本参数密度的测定

（一）实验目的：

了解岩石基本参数密度 ρ 的测定方法，掌握测定仪器的使用。

（二）设备：

1. 真空干燥箱
2. 精密分析天平
3. 研钵
4. 比重瓶或量桶
5. 电炉
6. 水槽

（三）原理及装置：

单位体积的岩石的质量，即叫做岩石的密度，单位克 / cm^3 。我们所指单位体积的质量，而不是重量，即说明在谈到岩石的密度时，与当地的重力加速度是无关的。同时岩石中含有孔隙，因此一块岩石的体积 V ，等于固体物质的体积 V_g 加上空隙的体积 V_p ，我们把包括孔隙的岩石密度称为**体积密度**，通常称为岩石的密度 ρ ；而把岩石中固态物质的密度称为岩石的**颗粒密度** ρ_g 。

（四）实验步骤及数据处理：

1. **比重瓶法：**比重瓶法测定岩石的密度，这是最经典的方法，比重瓶是一细颈球形玻璃瓶，瓶塞中心有一毛细小孔，当此小孔顶端出现水珠时，即认为比重瓶充满了液体。首先将比重瓶洗净，而后烘干，放入保干器内冷却，然后置于分析天平上称得空比重瓶的质量 M ，再将比重瓶充满蒸馏水，放入 20°C 的水槽中（ 20°C 时蒸馏水的比重为 1），半小时取出擦干并称得其总质量 M_1 ， M 、 M_1 两可预先测出。为了求出岩石的颗粒密度 ρ_g 先将岩石用研钵磨成细粉末，将粉末倒入空比重瓶内，数量约占瓶的 $1/3$ ，再称重求出岩石粉末的质量 M_g ，然后再向瓶内倒蒸馏水至瓶体积的 $2/3$ ，放入水槽内煮沸约 30 分钟，使空气从岩石中排出，然后再将瓶充满蒸馏水放入 20°C 的水槽 30 分钟，取出后擦干，这时再称出**比重瓶 + 岩石粉末 + 蒸馏水**的质量 M_2 ，则可用下式计算出岩石的颗粒密度 ρ_g 。

$$\rho_g = M_g / (M_1 + M_g - M_2)$$

该方法测得密度精度较高，但需岩石粉末量大，手续烦，计算量大。

2. 有机液体介质称量法：根据阿基米德原理，固体在液体中失去的重量等于它所排开的同体积的液体的重量。这种方法常使用浸透能力强的有机液体，如四氯化碳、酒精等。液体的比重越大，测定的误差就越小。四氯化碳的密度为 $1\,600\text{ kg/m}^3$ ，常被用于作为浸湿液体，我们记其密度为 ρ_l 。取一岩石标本在空气中称重，得其重量为 M_g ，然后将其置于天平的吊环上，在其下放置装有浸湿液体的烧杯，标本完全浸入液体中，不得碰到杯壁，称得岩石在液体中的浮重 M_1 ；然后除去标本，将吊环置入液体中称重，得 M_2 。即可按下式求出岩石的颗粒密度 ρ_g 。

$$\rho_g = M_g \rho_l / (M_g - (M_1 - M_2))$$

3. 岩石的体积密度 ρ 取决于岩石的矿物组成、孔隙度及孔隙流体的存在。一般的情况下，我们不考虑孔隙水的存在，即只把干燥岩石的体积密度作为岩石的参量。液体浸透法，将岩样放入干燥箱中干燥后，放保干器内冷却，称出其在空气中的重量 M_a ，然后再将岩样在真空条件下放入四氯化碳液体（密度 ρ_l ）中饱和（至少1小时），岩样饱和后取出，揩干表面液体，按2同样方法，分别称出饱和岩样在空气中重量 M_g 及在液体中的浮重 M_1 ，以及吊环浮重 M_2 即可计算岩石的密度 ρ

$$\rho = M_a \rho_l / [M_g - (M_1 - M_2)]$$

同样，我们也可将岩样干燥后，称出其重量 M_a ，然后将岩样浸入熔化的石蜡里（石蜡的比重已知 ρ_s ），直到标本上凝有一层石蜡为止。注意石蜡不可过度加热，以防渗入标本孔内，一般不超过 70°C 。石蜡包好的样品重新称重得 M_s ，这石蜡的重量即为 $M_s - M_a$ ，石蜡的体积为 $V_s = (M_s - M_a) / \rho_s$ ，用与2同样的方法，称出封石蜡标本在液体中的重量 M_1 ，吊环在水中的重量 M_2 ，这样先计算出封石蜡标本的体积 $V = [M_s - (M_1 - M_2)] / \rho_l$ ，再计算出岩样的密度 ρ

$$\rho = M_a / (V - V_s)$$

在工程上所用的指标是岩石的容重，也即岩石的体积密度，单位为千牛/米³，其分为干容重、湿容重、饱和容重（三者数值上一般差别不大）；岩石的容重表示为

$$\gamma = W \text{ (岩石的重量千牛)} / V \text{ (岩石的体积米}^3\text{)}$$

γ_d 为干容重, γ_m 为饱和容重。容重的大小在一定程度上反映出岩石的力学性质的情况, 通常岩石的容重愈大, 其力学性质愈好, 反之愈差。如图表示岩石的单轴抗压强度与容重的关系, 即可见容重对岩石力学性质的影响是显著的。

岩性	标本号	空比重瓶重量 M	比重瓶充满蒸馏水总重量 M_1	岩石粉末重量 M_g	比重瓶+岩石粉末+蒸馏水总重量 M_2	岩石颗粒密度 ρ_g

岩性	标本号	浸透液体密度 ρ_l	岩石标本在空气中重量 M_g	岩石在液体中浮重 M_1	吊环在液体中浮重 M_2	岩石颗粒密度 ρ_g

岩性	标本号	浸透液体密度 ρ_l	干燥岩石标本重量 M_a	饱和岩石标本重量 M_g	饱和岩石标本在液体中浮重 $M_1 - M_2$	岩石颗粒密度 ρ_g

实验九 岩石孔隙度的测定

（一）实验目的：

了解岩石基本参数孔隙度 η 的测定方法，掌握测定过程及仪器的使用。

（二）设备：

同实验七。

（三）原理及装置：

岩石的孔隙度是指许多形状、大小各不相同的存在于岩石的固体矿物间的所有孔洞而言，岩石中这些孔隙所占的体积 V_P 与岩石的总体积 V 之比，即称为岩石的孔隙度 η ，即 $\eta = V_P / V$ 。岩石中的孔隙可以分为二类，一类是孔隙彼此相通，并达到岩石表面，大气可以流通，称之为连通孔隙；另一类孔隙与岩石的表面不相连通，称为隔离孔隙。当我们考虑岩石内部的所有孔隙时，所得的结果，称为岩石的总孔隙度；若只考虑连通孔隙时，所得的孔隙度称为岩石的连通孔隙度或视孔隙度。

（四）实验步骤及数据处理：

1. **总孔隙度的测量。**由实验七我们分别测得岩石的密度 ρ 及其颗粒密度 ρ_g ，则可根据下式计算出岩石的总孔隙度 η 。

$$\eta = (\rho_g - \rho) / \rho_g \times 100\%$$

2. **连通孔隙度（视孔隙度）的测量。**首先将岩石样品在干燥箱内干燥后，在空气中称出岩样的重量 m_0 ，然后把样品置于真空皿中抽真空，并注入密度为 ρ_l 的某种液体使之饱和，1 小时后取出样品，仔细擦干样品表面的液体，并称出其重量 m_1 ，再由实验八求出岩样的总体积 V ，即可由下式求出岩样的视孔隙度 η_l 。

$$\eta_l = (m_1 - m_0) / (\rho_l V) \times 100\%$$

或称得干燥样品的重量 m_0 ，再在真空条件下在液体中浸泡 1 小时使之饱和；然后按实验七中将样品置于天平的吊环上在溶液内称重，称得其重量 m_2 ；将样品取出，仔细擦干表面的液体，并进行称重，得 m_1 ；称出吊环在液体中的重量 m_3 ，即可计算出样品的视孔隙度 η_l 。

$$\eta_l = (m_1 - m_0) / (m_1 - m_2 + m_3) \times 100\%$$

岩 性	标本号	干燥标本重量 m_0	浸透标本在溶液中 重量 m_2	浸透标本重量 m_1	吊环在溶液中 重量 m_3	岩石视孔隙度 η_l

实验十 岩石压缩实验

(一) 实验目的：

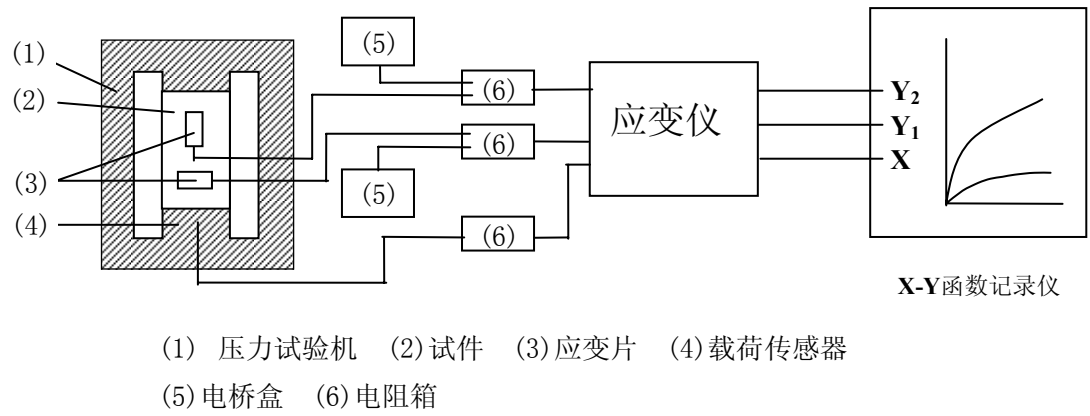
在单轴压力下作出岩石样品的应力与应变的关系曲线（ $\sigma - \varepsilon$ ），以确定压缩时岩石的强度极限 σ_b 。观察岩石压缩时的变形及破裂过程。

(二) 设备：

- 1. 压力试验机
- 2. 电阻应变仪
- 3. X-Y 函数记录仪
- 4. 应变片
- 5. 游标卡尺

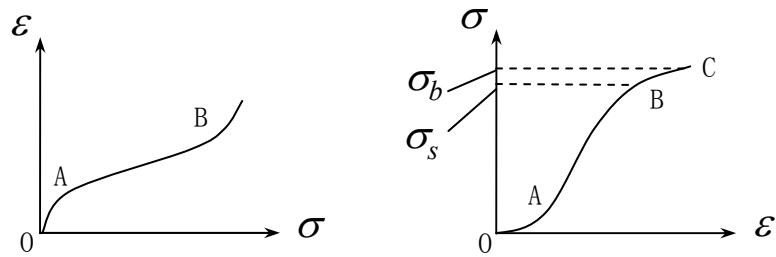
(三) 原理及试验装置：

为了真实反映岩石的强度,根据国际岩石力学标准化委员会试验的建议方法,用来试验用的试件通常规定， $2 \leq h / d \leq 3$ ，试件直径与岩石内最大颗粒尺寸的比大于10。我们试验用岩石试件一般制成园柱形，其尺寸约为 $L : 50\text{ mm}$ $\Phi : 25\text{ mm}$ 或 $L : 100\text{ mm}$ $\Phi : 50\text{ mm}$ 。为了尽量使试件承受轴向压力，试件两端必须完全平行（一般要求 < 5 丝），并且与试件轴线保持垂直，其端面还应制作光滑，以减小摩擦力的影响，必要时端面可涂薄薄的一层油。放置试件时要将其置于压机的中心，使压力通过试件的轴心。实验装置如图一所示：



图一 压缩实验装置图

试验利用 X—Y 函数记录仪绘出 $\sigma - \varepsilon$ 曲线，图二：



图二 $\sigma - \varepsilon$ 曲线

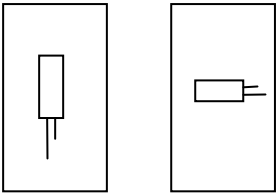
图中 O A 段为做功硬化阶段，试件中裂隙闭合，A B 为弹性变形阶段，B C 为塑性变形，试件应变软化。当加载至最大载荷 P_b 时，试件破裂，在曲线上即 C 点，也可通过计算得出其强度极限 σ_b 。当试件破裂时，压力试验机的测力指针迅速倒退，由随动指针可读出最大载荷 P_b 值。破坏的破裂面与试件轴线约成 45° 左右的倾斜裂纹或 X 型裂纹，破坏主要是由剪应力引起的。

(四) 实验步骤：

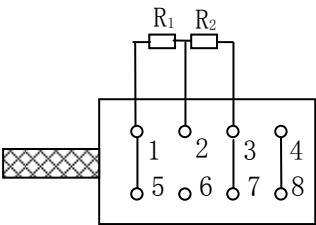
1. 试件准备：

用游标卡尺测量试件两端及中部三处截面的直径，取三处中最小一处的平均直径来计算截面面积，并根据此试件及破坏时载荷计算出其强度极限 σ_b 。

贴应变片：(1) 先用细砂纸将样品中部待贴片处（如图三）打磨，一处为贴纵向应变片，一处为贴横向应变片。(2) 用丙酮棉球将贴片处清洗干净；(3) 将应变片的引线先镀上焊锡；并用万用表检查应变片是否通路，阻值大小；(4) 一手捏住应变片引出线，一手拿 502 粘结剂瓶，在应变片基底面上及试件欲贴片处均匀涂上一层粘结剂，注意不可涂抹太多，以免影响应变片的性能；应变片底面向下平放在试件贴片处，将一小片聚四氟乙烯薄膜盖在应变片上，然后用拇指按住薄膜挤出多余的粘接剂（注意按时不要使应变片移动），拇指按住保持不动并施予压力约 1—2 分钟放开，轻轻掀开薄膜，检查应变片处有无气泡、翘曲、脱胶等现象，



图三 电阻应变片的粘贴



图四 电桥盒接线图

象，否则需重新粘贴。(5) 将应变片引线剪短约留 5—10 mm，在试件上贴一小块胶布，使其与试件绝缘。事先将测量导线塑胶皮剥去约 2 mm，镀上焊锡，然后将其与应变片引线焊接，焊点要光滑小巧，防止虚焊，再用万用表检查是否通路，阻值正确，并用胶布将导线固定在试件上，以免拉脱。

2. 联接：

将应变片的测量线与电桥盒联接，作半桥测量时，接线图如图四所示，其中 R_1 为应变片， R_2 为补偿电阻箱，联接时要接触良好。

仪器联接如图一所示，由电阻应变仪后面板的电压输出插孔输出应变信号，纵向应变接 X—Y 记录仪的 Y_1 ，横向应变接 X—Y 记录仪的 Y_2 ；联接完毕检查各接点接触是否良好、通路。

3. 试验机准备：

开动试验机，打开进油阀，将试验机活动台升起一定高度（约 2 mm），调整测力指针，对准零点，并使随动指针与之靠拢。将测力传感器的输出线经电桥盒、电阻应变仪与 X—Y 记录仪的 X 联接。先进行载荷标定，放一钢试件在试验机活动台上，注意放在中心位置，拧下上压板，（注意勿使试件受力，仅刚刚接触即可）启动压机，打开进油阀，使活动台缓慢上升，以免急剧加载，形成冲击力，一般试验的应力速率在 $0.5 \sim 1 \text{ MPa} / \text{s}$ 之内，即试验破坏发生在加载的 5—10 分钟内。试件与上压板接触受力后，慢速加少量载荷，然后卸载至零点，以检查试验机是否正常，同时再调整测力指针使其对准零点。开始加载，当刻度盘上指针指至某一单位载荷时，相应地在 X—Y 记录仪上的记录笔在 X 轴方向移动了一定的距离，打上记号，继续下去，我们即可得到一条代表载荷变化的 X 轴。根据估计试件的强度，预计最大载荷，适当选取 X—Y 记录仪上的 X 的灵敏度调节，以便作出较好的记录图。本实验一般选取 $50 \text{ mV} / \text{cm}$ 、 $10 \text{ mV} / \text{cm}$ 几挡。

4. 电阻应变仪平衡调节：

电阻应变仪的调节参见电阻应变仪的使用。调节后，根据被测应变大小，选择适当的衰减挡，本实验一般用“30”挡。然后进行应变标定，标定信号是测量的标准尺度，在不同的衰减挡时，施加相应的“标定”信号以衡量被测信号的大小。拨动应变仪上“标定”开关，绘出相应的标准应变信号，相应地在 X—Y 记录仪上的 Y 轴方向，会有不同的位移量，打下标记，注明应变值，并观察在 X—Y 记录仪上的标度大小是否理想，根据需要调节 X—Y 记录仪 Y_1 、 Y_2 的灵敏度调节电位器，加以选择。本实验一般取 $50 \text{ mV} / \text{cm}$ 挡。

5. 实验过程:

将试件放在试验机的中心，慢慢拧下上压板，使之与试件良好接触，但不要施予压力。打开试验机，缓慢均匀地加载，注意观察测力指针的转动及记录仪上的记录。将试件压至破坏，即获得其 $\sigma - \epsilon$ 曲线。同时记下加载开始及试件破坏时的时间，得出加载时间。注意试验时若发生任何故障，应立即停机。

6. 实验完毕:

关闭所有仪器的电源及总电源开关，清扫试验机并将其一切机构复原。取下记录图纸及标定图纸。

(五) 实验结果处理:

根据实验记录计算出岩石的强度极限 $\sigma_b = P_b / A_0$ ， A_0 为试验前试件的横截面积。再根据记录的应变量和加载时间计算出实验的应变速率 $\dot{\epsilon} = \epsilon / t$ 。在该试验中以压应力、压缩应变为正。

(六) 思考题:

1. 为什么在压缩时一般与轴线大致成 45° 的斜截面破坏？
2. 为什么试验机调整时要将活动台升起一定的高度？

实验十一 压缩时岩石弹性常数的测定

(一) 实验目的

了解电阻应变测量技术，在岩石弹性变形的阶段内，测定岩石的弹性模量 E ，泊松比 ν 。

(二) 设备：

1. 材料试验机
2. 电阻应变仪
3. X—Y 函数记录仪
4. 应变片
5. 游标卡尺

(三) 原理及装置：

1. 测定弹性模量 E ：

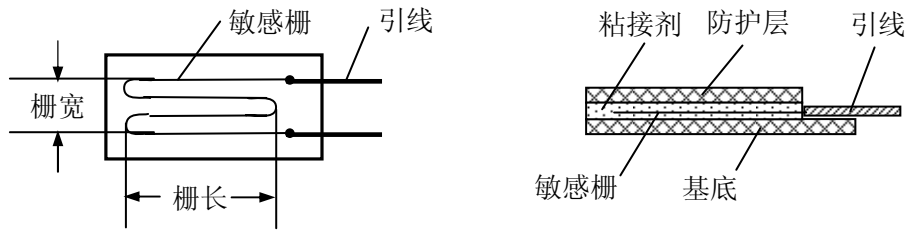
测量岩石的弹性模量，采用压缩实验。岩石在弹性变形阶段服从虎克定律， $E = \sigma_l / \epsilon_l$ 其中 $\sigma_l = P / A$ 。 $\epsilon_l = \Delta L / L$ 。我们采用电阻应变测量技术，直接测量出岩石的应变变量 ϵ_l 。

2. 测定泊松比 ν ：

所谓泊松比即为横向伸长相对于纵向缩短的比率 $\nu = -\epsilon_2 / \epsilon_l$ ，我们同样也采用电阻应变测量技术，用一横向应变片及一纵向应变片分别测得横向应变及纵向应变，计算出其泊松比 ν 。（横向应变实际是由测量环向应变获得，其二者相等）

3. 电阻应变计：

在本实验中电阻应变计我们所指是电阻应变片，其构造如图一所示，其中敏感栅是用具有一定阻值的金属丝绕制成或用金属箔光刻而成，常用的有铜镍合金、镍铬合金、铁铬铝等；基底用纸或胶膜等制成；防护层一般也采用纸或胶膜。应变片固定在试件的测点上，当试件受载产生应变时，应变片中敏感栅随之产生相同的应变，由于金属丝在伸长或缩短时其电阻值会发生相应的变化，因此应变片便将试件的应变转换为电阻的变化。根据关系式 $\Delta R / R = K \epsilon$ (1) 可见金属丝的应变与单位电阻的变化成正比，其中 K 为应变片的灵敏系数。当然还有一些如横向效应系数、敏感材料性能、蠕变、机械滞后等都与测量有关，在此不一一赘述。

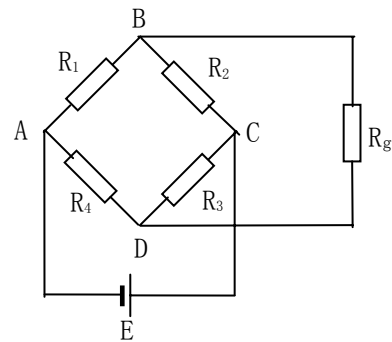


图一 电阻应变片的构造

4. 测量电路:

在电阻应变仪中一般用电桥将应变片的电阻变化转换成电压或电流的变化，如图二，直流电桥（惠斯顿电桥）

的桥臂由 R_1 、 R_2 、 R_3 、和 R_4 四个电阻组成，A、C 两端为电压端，其直流电压为 E ，B、D 两端为输出端其负载电阻为 R_g ，一般情况下电桥输出端配电阻应变仪高输入阻抗的放大器，其负载电阻可视为无穷大，输出端处于开路状态，这称之为电压桥。据电路计算，可得其输出电压。 ΔU 与电源电压 E 及桥臂电阻的关系为：



图二 直流电桥示意

$$\Delta U = (R_1 R_3 - R_2 R_4) E / (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) \quad (2)$$

若 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ ，则 $U = 0$ ，电桥处于平衡状态，在测量前使 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 或 $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_4$ ，满足平衡条件，若各桥臂电阻产生一微小的增量（分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 ）则由(2)式可得电桥输出电压为：

$$\Delta U \approx E / 4 (\Delta R_1 / R_1 - \Delta R_2 / R_2 + \Delta R_3 / R_3 - \Delta R_4 / R_4) \quad (3)$$

用应变片作为桥臂，其应变分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 时用(1)式带入(3)式则有：

$$\Delta U \approx 1 / 4 E K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (4)$$

由此可见，电桥可将应变片的应变转换为电压增量。如果电桥上仅一桥臂为应变片（如 R_1 ），其它臂为固定电阻，当应变片具有应变 ε_1 时，据 (4) 式可得

$$\Delta U = 1/4 E K \varepsilon_1 \quad (5)$$

测定 ΔU 值后，便可求出 ε_1 值，也即得到了应变。

5. 实验装置同实验一（压缩实验）

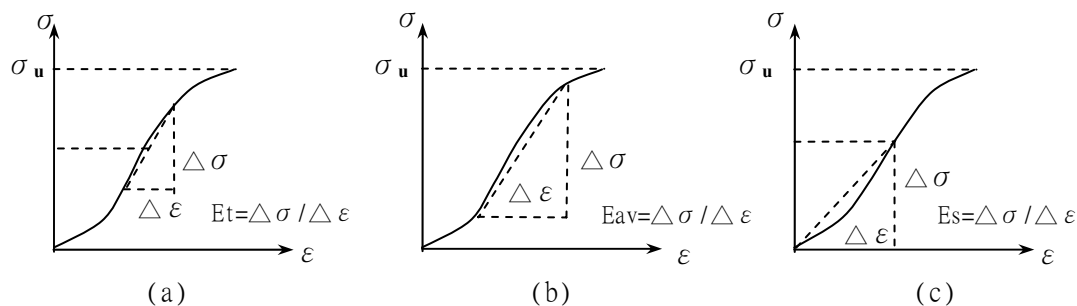
（四）实验步骤：同实验一（压缩实验）

注意在应变标定时要分别标定纵向应变和横向应变，由于应变相差较大，在电阻应变仪和 X—Y 函数记录仪上可能要调节不同的衰减和灵敏度，但为了直观及计算的方便，尽量采用相同的衰减和灵敏度。X—Y 函数记录仪的 X 轴为载荷， Y_1 为纵向应变， Y_2 为横向应变。加载后即可分别画出纵向及横向的应力—应变曲线。

（五）实验结果处理：

一般弹性模量 E （轴向应力的变化量与由应力引起的轴向应变的比值）可由以下几种方法之一计算出来。

1. **切线弹性模量**，根据某一应力水平（极限强度的某一固定百分率）测出的（图三 a），此应力水平通常取单轴抗压极限强度的 50%。



图三 弹性模量的选取

2. **平均弹性模量**，由纵向的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线，取其弹性直线段部分，其平均斜率即为所测岩石的弹性模量 E （图三 b）。取几个点计算，再按算术平均值求出弹性模量。

$$E = \sigma / \varepsilon \quad E = \Sigma E_i / n \quad (i = 1、2、3 \cdots n)$$

3. 割线弹性模量，通常是由零应力到极限强度某一固定百分率（常用 50%）范围内测出的（图三 c）。

在纵向应变及横向应变曲线均为直线的区间，取同一载荷下的横向和纵向应变之比，计算出岩石的**泊松比**，同样取几个点计算，再计算其算术平均值，求出泊松比值。

$$\nu = -\varepsilon_2 / \varepsilon_1 \quad \nu = \Sigma \nu_i / n \quad (i = 1、2、3 \cdots n)$$

泊松比 ν 还可由下式计算

$$\begin{aligned} \nu &= -\text{纵向应力应变曲线斜率} / \text{横向应力应变曲线斜率} \\ &= -E / \text{横向应力应变斜率} \end{aligned}$$

也可将纵向应变 ε_1 输入 X—Y 记录仪的 X 轴，横向应变 ε_2 输入 X—Y 记录仪的 Y 轴，这样画出 ε_1 — ε_2 曲线，该曲线上直线段的斜率即为其泊松比的数值。

（六）思考题：

1. 纵向应变及横向应变在与 X—Y 函数记录仪联接时有什么差别？为什么？
2. 在从记录图上计算泊松比 ν 值时，要注意什么问题？
3. 试件的尺寸和形状对测量弹性模量有无影响？

实验十二 频谱振幅比法测岩石中波的衰减

（一）实验目的：

通过实验了解波在介质中传播时的衰减特性，并掌握其测量方法。

（二）实验设备：

1. SYC—2超声岩石参数测定仪
2. BC—V瞬态波形存贮仪
3. X—Y函数记录仪
4. 前置放大器
5. 发射、接收换能器若干对
6. 标本夹持架
7. 铝参考样品
8. 岩石样品

（三）原理及实验装置：

我们已在附录中介绍了有关衰减的基本知识，基于Q值测量的困难，受到诸多因素的影响，现实实验室测量中大多采用频谱振幅比的方法，以消除各种因素的影响。取一高Q值的铝作为参考样品，其有待测岩石样品具有精确相同的几何形态，并确保换能器的耦合及测量程序的相同。将岩石样品中波的衰减情况与铝参考样品中的情况进行比较，藉以去掉几何条件，耦合条件等因素的影响。

对于参考样品（1）和岩石样品（2），其平面波振幅可写成：

$$A_1(f) = G_1(x)e^{-\alpha_1(f)x}e^{i(2\pi ft - k_1x)}$$

$$A_2(f) = G_2(x)e^{-\alpha_2(f)x}e^{i(2\pi ft - k_2x)}$$

其中：A（f）—振幅谱，f—波的频率，x—传播距离即为样品的长度， $k_1=2\pi f/V_1$ —波数，V—波速，G（x）—非指数衰减的几何因子，包括几何扩散、界面折射、反射等等， α （f）—衰减系数，与频率有关，其在一很宽的频率范围内是f的线性函数， α （f）= γ f，其中 γ 为常数，它与品质因数的关系为

$$Q = \frac{\pi}{\gamma V} \quad \text{即} \quad \alpha = \frac{\pi f}{QV}$$

由于参考样品与岩石样品的几何形态完全一致，且换能器耦合及测量程序相同， G_1 和 G_2 是与频率无关的几何衰减因子，则其傅里叶谱振幅比为：

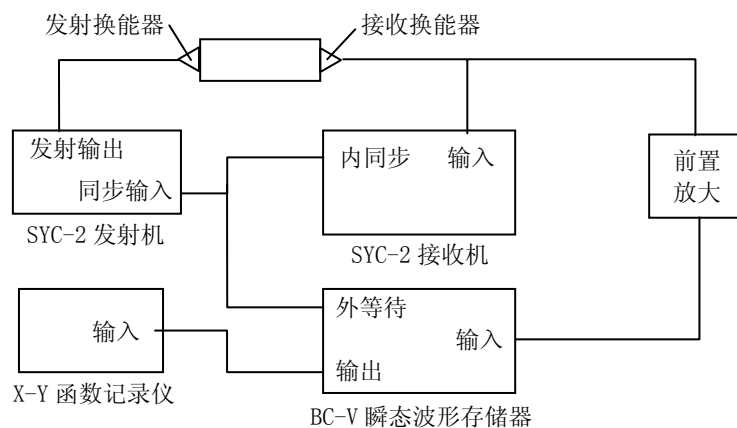
$$\frac{A_1(f)}{A_2(f)} = \frac{G_1}{G_2} e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)fx}$$

或

$$\ln \frac{A_1(x)}{A_2(x)} = (\gamma_2 - \gamma_1)xf + \ln \frac{G_1}{G_2}$$

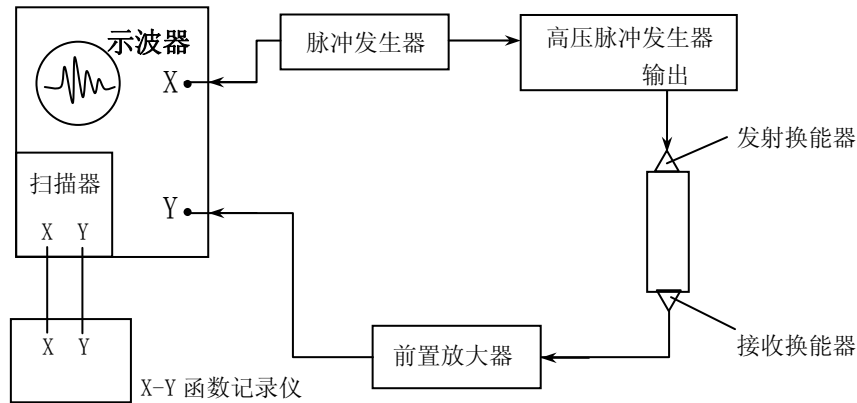
此关系式即是在以 $\ln \frac{A_1(x)}{A_2(x)}$ 为纵坐标，以 f 为横坐标的坐标系中，表示为一条直线，其斜率为 $(\gamma_1 - \gamma_2)x$ 。由于参考样品是一高 Q 值介质，如铝其品质因数 $Q > 10,000$ ，则可认为 $\gamma_1 \approx 0$ ，于是则可以求出 γ_2 ，再由 $Q = \pi / \gamma V$ 计算出岩石的 Q 值。该直线的截距即表示为两样品的几何衰减因子的差别。对于 $Q=10 \sim 100$ 的岩石样品，其误差小于1%，但若 Q 值太高， γ 过低，用线性回归法求曲线的斜率即有困难。该方法在实验技术上要求严格，精确，以排除测量上的误差。

该实验的测量系统如图一所示。



图一 频谱振幅比法测量系统框图

系统中的SYC—2型超声岩石参数测定仪实际上也就是一套脉冲发射与接收系统，因此一般的测量系统可如图二所示：



图二 一般测量系统框图

由于计算机技术的发展，其测量系统大大的简化，可通过 SYC—3 型或 SYC—2 型等超声岩石参数测定仪与计算机的接口，经高速采样系统直接将波形采样存入计算机中，然后在计算机上进行数据处理即可。

（四）实验步骤：

1. 打开声波仪及计算机，进入采样程序，做好采样准备。
2. 将发射及接收换能器分别置于参考样品的两端，用凡士林或黄油等耦合剂，使换能器与样品之间耦合好，在此我们发射及接收换能器的谐振频率均采用1兆赫左右的PZT—5陶瓷压电晶片。
3. 将样品及换能器一起置于标本夹持架中，稍施加压力，注意要记住所施压力的大小，以便在测量岩石样品时，能施以同样的压力，以保证参考样品与其之间的实验条件，状态一致，减小测量中的误差，因为压力对波形振幅的影响较大。
4. 调节声波仪的增益、衰减以及发射脉宽等，直到在荧光屏上观察到较为满意的波形为止。同样为了保证参考样品与实验样品之间的条件一致，其增益、衰减、脉宽等都要保持不变。
5. 计算机采样存盘，因为我们是计算纵波的衰减，所以取所采波形的纵波1.5~2个周期，进行快速傅里叶变换（FFT），作出振幅谱。
6. 以同样的步骤记录下岩石样品的波形，作出振幅谱。
7. 测出岩石样品的波速存入计算机中。

（五）数据处理：

在计算机上计算出参考样品与岩石样品的频谱比，最后再由频谱比的斜率得出岩石试件的Q值。

在计算公式中有试件的长度 \mathbf{x} ，因此计算时，要将其长度 \mathbf{x} 的值输入到计算机中。

实验十三 试验机刚度的测量

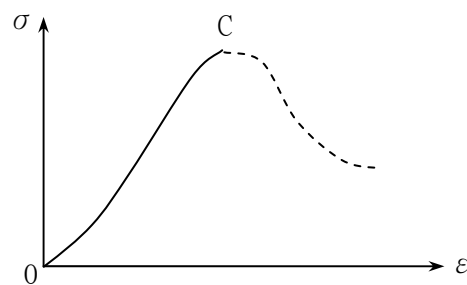
（一）实验目的：

（二）实验设备：

1. 弹性元件（钢试样）
2. 应变片
3. 秒表
4. 千斤顶
5. 千分表

（三）原理及实验装置：

岩石力学的实验，很多都是沿用金属材料的实验设备，但是随着现代技术水平的不断提高，要求岩石力学实验研究推进到新的水平，同时由于岩石材料与金属材料的基本属性截然不同，对实验设备提出了新的要求。一般的普通试验机属于柔性试验机，我们在进行岩石压缩实验时可以看到，我们以恒定的加载速率加载时，当达到岩石的强度极限时，岩石样品会突然地崩裂，这时所记录下来的应力—应变曲线也只有前半程（即峰值前面的一段 OC 段），而峰值以后的变化则记录不下来，如图一。这是由于岩石样品崩裂之后其承载的能力大大降低了，但是压力试验机的载荷却无法随之降低，而是继续加载，使样品彻底



图一 岩石的全程应力—应变曲线

崩溃。其原因在于普通试验机的刚度小于岩石类材料的刚度，也即试验机所储存的弹性形变能大于岩石样品储存的弹性形变能，当对试样施加的载荷达到极限值时，试样中出现宏观裂纹，而这时试验机内所储存的大量弹性能即立即释放，对试样施加了一远远超过极限

强度的附加载荷，使试件突然破坏。因此只有提高试验机的刚度，采用大刚度试验机（即刚性试验机）才可测量出岩石的全程应力—应变曲线。

设试验机的刚度为 K_m ，岩石样品的刚度为 K_s ，加载时试验机压板的位移 U_m ，试件的压缩变形 U_s ，试验机施加的载荷 F_m ，试件承受的载荷 F_s 。通俗的讲刚度即是产生单位变形时，所能承受的载荷，或称力—位移曲线的斜率即是载荷。我们可得出以下的力学关系：

$$F_m = -K_m U_m \quad (1)$$

$$F_s = K_s U_s \quad (2)$$

当实验系统处于平衡状态时，则有

$$F_m = F_s \quad (3)$$

或
$$-K_m U_m = K_s U_s \quad (4)$$

如果岩样 X—Y 位移曲线是非线性的，这时即有

$$F_s = f(U_s) \quad (5)$$

平衡的条件则为

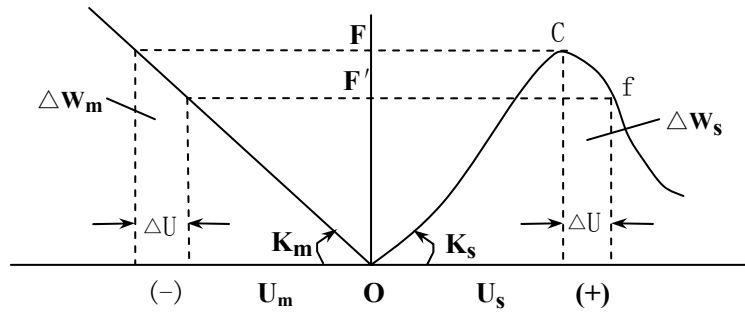
$$-K_m U_m = f(U_s) \quad (6)$$

只要试验机不继续对试样施加载荷，这平衡就不会被破坏。

当载荷超过了试样的强度极限，但试样产生位移（ ΔU ）所需要的能量（ ΔW_s ）大于试验机提供的能量（ ΔW_m ），即

$$\Delta W_s - \Delta W_m > 0 \quad (7)$$

时，实验系统就能保持稳定的破坏。由图二中可知



图二 试验机—试样系统力学关系示意

$$\Delta W_m = (F' + \frac{1}{2} \Delta F_m) \Delta U \quad (8)$$

$$\Delta W_s = (F' + \frac{1}{2} \Delta F_s) \Delta U \quad (9)$$

式中 F' 是产生位移 ΔU 时的载荷。 ΔF_m 和 ΔF_s 分别取决于试验机和岩样的刚度，在强度极限后岩石样品的刚度是非线性的，这时即有

$$\Delta F_m = -K_m \Delta U \quad (10)$$

$$\Delta F_s = f(U_s) = K_s \Delta U \quad (11)$$

这里 K_s 是岩样在强度极限后测点 (f) 处曲线的斜率； ΔU 是强度极限点 C 后产生的位移。

我们将式 (10) (11) 代入式 (8) (9) 中整理后代入式 (7) 即得

$$K_s + K_m > 0 \quad (12)$$

因为 K_m 没有负值，而在强度极限之后 K_s 的值变成了负值，所以只要有

$$K_m > |K_s| \quad (13)$$

时，实验系统即能保持平衡。所以说只要采用刚性试验机，才可测出岩石的全程应力—应变曲线。

对于试验机来讲，它的刚度取决于各部件的刚度，如活塞杆、加载头、螺栓、液压油等。试验机则是由这些部件的串联和并联组成。当串联时，整体刚度为各部分刚度倒数和的倒数；

$$K_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i}} \quad \text{tf/mm} \quad (14)$$

并联时，整体刚度为各部分刚度之和

$$K_m = \sum_{i=1}^n K_i \quad \text{tf/mm} \quad (15)$$

式中 K_m 整体刚度， K_i 为部件刚度， n 为部件数，从这我们可看出部件并联可提高整机的刚度。其中某一长为 L ，截面积为 A ，弹性模量为 E 的部件，在受到单向压缩时，其刚度的计算为

$$K_i = \frac{AE}{L} \quad \text{tf/mm} \quad (16)$$

液压系统设油缸液柱的高度为 H ，体积模量为 K_0 ，截面积为 A 时，其刚度为

$$K_H = \frac{AK_0}{H} \quad (17)$$

为了提高试验机的刚度，一般有直接法和间接法两种方法。

1. 直接法：

按需要刚度去设计压力试验机，如增大构件的截面积，缩短构件的长度，采用压缩性极小的压力液体等。

2. 间接法：

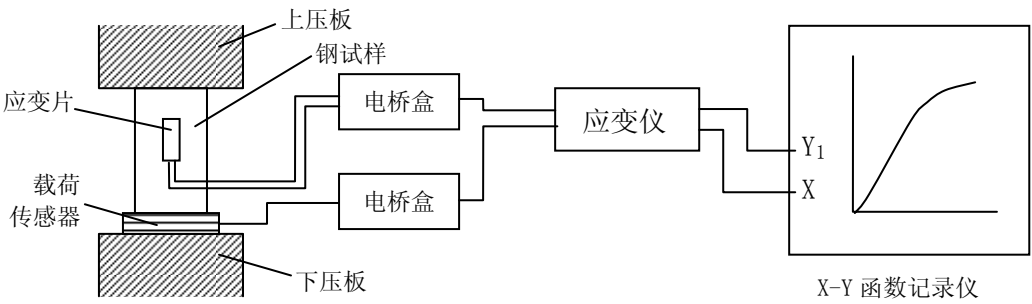
间接法是在原有的试验机的基础上，附加一些刚性构件以提高整个实验系统的刚度。如在试验机上与试样平行并放一些刚性组件（如刚性环等），那么整个系统的刚度就增加了刚性组件的刚度；还有利用温度效应，用热力加载等等。

从以上介绍我们可以看出，刚性主要是考虑力与轴向位移的关系，提高刚度也仅是从这一方面考虑。而目前国内外已大量采用新型的伺服控制试验机，可自动调节多种参数（如载荷、应变、位移、加速度等），为岩石力学实验提供了更加先进的手段。

实验系统的刚度测量，尚无统一规定的方法，一般采用的有经纬仪测量法，油阀控制测量法和千斤顶测量法等。本实验使用的是后两种方法。

①油阀控制测量法：

由于我们的试验机是液压试验机，由油泵供油，使活塞推动下压板上升，上下压板间的试件受力。由于送油阀可使油压与油缸保持一恒定的压差，当我们将送油阀开到某一开度保持不变，那么即使压力不断增加，而单位时间的供油量任保持不变。这样在试件的弹性变形范围内，试验机的供油速度将分别提供给试件的弹性变形速度，试验机系统的变形速度和油缸的漏油速度。也即为供油的行程分为试件的纵向位移，试验机的位移和漏油行程三部分。装置如图三所示。



图三 油阀控制测量法装置图

②千斤顶测量法：

在试验机的上下压板之间安置千斤顶和千分表。用千斤顶对压力试验机进行加载，记录千分表的读数及相应的压力值，即可计算试验机的刚度。装置如图四。

（四）实验步骤：

1. 油阀控制测量法：

① 连接，选用一尺寸为 $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ 的钢柱作为试样，在其侧面纵向对称粘贴应变片，按半桥或全桥方式接入电桥盒，送至应变仪，再将应变仪的输出接至 X—Y 函数记录仪的 Y 轴，将试验机的载荷传感器通过应变仪接至 X—Y 记录仪的 X 轴。

② 标定，按照岩石压缩实验介绍的标定方法，分别标定出X坐标（载荷）和Y坐标（应变）。然后对试件加载作出弹性形变段的应力—应变曲线。由于 $\varepsilon = \Delta L / L$ ，所以我们可以根据应力—应变曲线中试件的应变值计算出相应的形变即试件的纵向位移 U_s (mm)，即 $\Delta L = \varepsilon L$ 。

③ 测试，首先将送油阀开至一固定的开度，在空负荷状态下，测出下压板的上升时间和行程，也就是可计算出供油的速度 (V_i)；拧下上压板与试件接触，然后将送油阀开至同一开度，将试件加载至某一压力 P ，这时可以从X—Y记录仪的曲线中得出试件在此载荷时的压缩量 U_s (mm)，同时可由供油速度 V_i 及加载时间，算出供油行程 U_i ；减小送油阀的开度，稳压约半分钟，记下这时油阀的开度。

④ 测试漏油行程 (U_0)，在空负荷的状态下，将送油阀开至稳压时的开度，测出下压板的上升时间和行程，即可计算出一供油速度，此时即为漏油速度 V_0 ，活塞的行程为漏油行程 (U_0)。根据我们加载的时间，我们可算出实验时的漏油行程 U_0 (mm)。

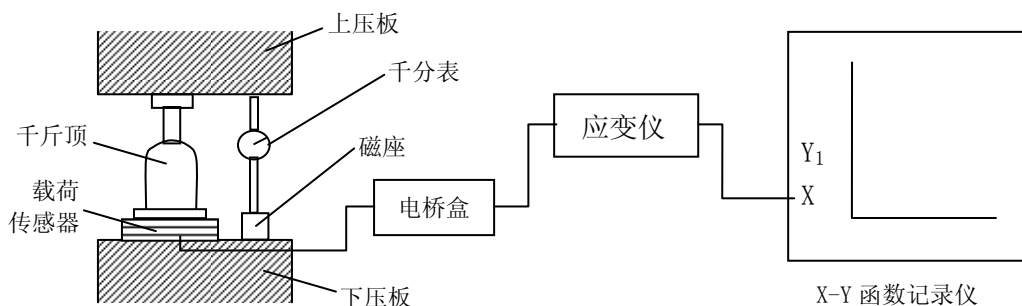
⑤ 分别加载至3~4个不同的压力，测试数据。

2. 千斤顶法：

① 标定载荷：将载荷传感器放置在压机上下压板之间，将输出通过电桥盒及应变仪送至X—Y函数记录仪的X轴，拧下上压板，启动试验机加载，在不同的载荷，记下标记，画出载荷坐标。

② 安装：将千斤顶及载荷传感器放置在试验机上下压板之间中心位置；千分表的磁座固定在下压板上，调节磁座杆及千分表的位置，使千分表的顶针顶在上压板上并调节好读数为零。

③ 测试：压动千斤顶杠杆，我们可看到X—Y记录仪的记录笔在X轴移动，当移至某一压力 P 时，停止加压，记下千分表的读数即上下压板间的位移 U_m ；然后卸载，再加压，记录千分表的读数，反复几次即可。



图四 千斤顶测量法装置图

（五）实验数据处理：

1. 油阀控制法：设试验机在加载时的位移为 U_m ，根据原理中介绍，有

$$U_i = U_s + U_m + U_0$$

则
$$U_m = U_i - U_s - U_0$$

根据刚度计算公式，试验机的刚度 K_m 有

$$K_m = \frac{P}{U_m} = \frac{P}{U_i - U_s - U_0} \quad (18)$$

实验数据：

载荷 (P)	供油行程 (U_i)	试件变形 (U_s)	漏油行程 (U_0)	刚度 (K_m)
P_1				
P_2				
P_3				
P_4				

如果我们采用控制加载速度的方法测量试验机的刚度，上式即可改写为

$$K_m = \frac{P}{U_m} = \frac{P/t}{U_m/t} = \frac{V}{V_i - V_s - V_0} \quad (19)$$

式中 t 为我们加载至 P 载荷时所需的时间 (s)。

2. 千斤顶法：

可由刚度计算公式

$$K_m = \frac{P}{U_m} \quad (20)$$

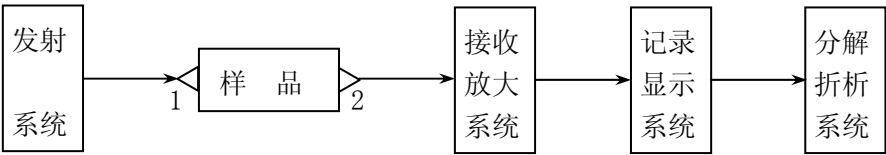
直接计算出试验机的刚度。

实验数据：

载荷 (P)	试验机位移 (U _m)	刚度 (K _m)
P ₁		
P ₂		
P ₃		
P ₄		

仪器一 声波岩石参数测定仪

随着超声探测技术的发展，相应的研制出了各种探测仪器，应用于岩体（岩石）超声探测的仪器和设备，它是以岩石力学特性为基础，研究声波或超声波在岩体（岩石）的传播规律，借以了解岩体（岩石）的动弹力学状态及其结构特征。目前国内外的探测仪器种类甚多，性能也各不相同，但它们的基本原理都大同小异。大体上具有发射、接收和记录（显示）三个系统，以及“电声”转换及“声电”转换系统。其工作的基本方法也不外乎如图一所示。



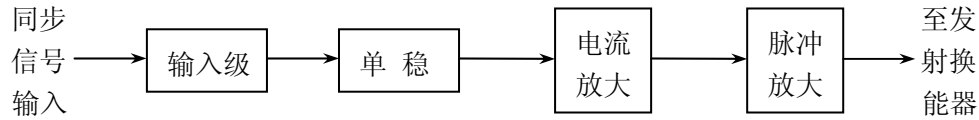
1. 发射换能器 2. 接收换能器

图一 仪器测量工作原理方框图

SYC~3型声波岩石参数测定仪

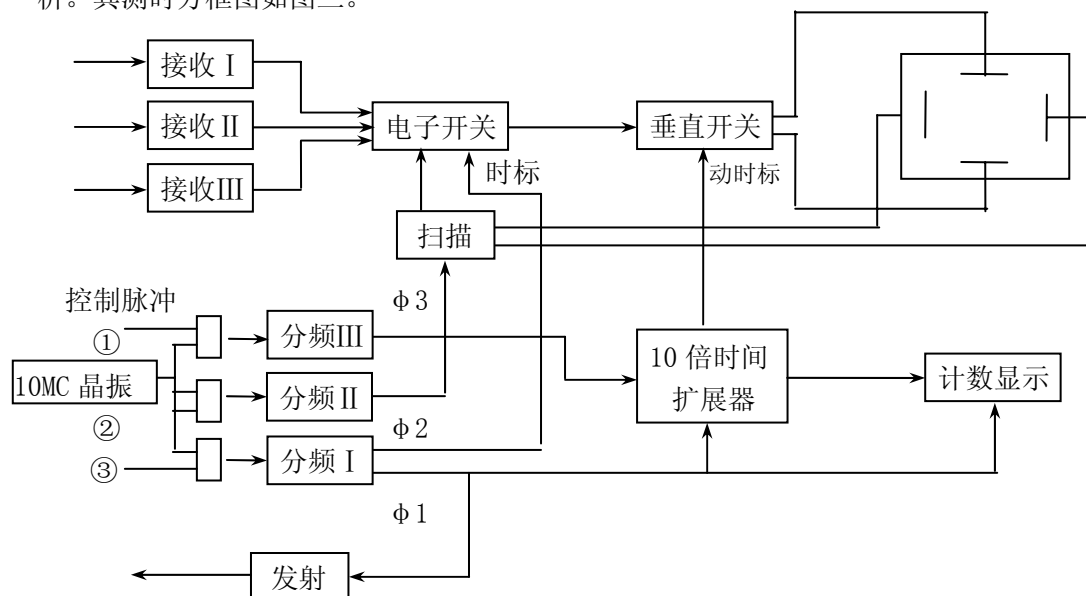
（一）构造原理：

仪器的发射、接收两大部分，由多谐振荡器进行同步控制工作。每个振动周期有一触发信号输出，它同时控制“发射延时”和“扫描延时”工作。“发射延时”将触发信号延时一段时间后输出给发射系统，让发射机工作，同时让计数器开始计数。“扫描延时”将锯齿波扫描经过适当的延时，以便接收放大的波形能呈现在示波管屏幕上。这个尖脉冲信号同时加到计数器，做计数器的关门信号，以便读到某一波形的到达时间 t 。发射系统：其电路原理框图如图二所示。其发射脉冲幅度分两挡，连续可调，最低幅值80V，最高可达1000V，脉冲宽度为0.2~5微秒。当接收系统的同步信号到来后，“单稳”输出一宽度可调的矩形脉冲，其经放大后，加在换能器的晶体上，引起压电晶体的机械振动。



图二 电路原理方框图

SYC~3型声波岩石参数测定仪, 主要为室内模拟及岩样试验使用, 用于研究岩样的结构分析、应力状态、弹性参数、岩样的物理性质以及工程地质、地震模拟实验等问题, 也可做短距离的现场测试。其具有手动、自动测时, 手动取样测幅和离散连续自动测幅等多种功能, 同时具有8421码正逻辑数据输出, 连接打印机或接口与计算机连接进行采样分析。其测时方框图如图三。



图三 声波仪测时方框图

晶振10Mc的频率经分频器 I、II、III输出 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 并同时输出为1ms或8ms。其为该机同步周期。 ϕ_1 直接控制发射输出、10倍时间扩展器及记数显示、复零电路。分频 II 受控制脉冲②控制使 ϕ_2 相对于 ϕ_1 延时, 延时时间大小由仪器面板上“左移, 右移”“移位, 复零”等开关控制, 延时以后的 ϕ_2 控制扫描电路, 使波形出现在示波器屏幕上适当的位置, 以便于观察和测量。同样可使 ϕ_3 相对于 ϕ_2 延时, 延时的大小亦由“左移, 右移”“移位, 复零”等开关控制, ϕ_3 (同 ϕ_1) 控制10倍时间扩展器, 产生时间 T_1 、 T_2 和 T_3 , 在误差范围内使 T_2 恒等于10倍 T_1 , 即 $T_2 \cong 10 T_1$, 调节面板上的多圈电位器, 可改变 T_1 和 T_2 的宽度, 但始终使 $T_2 \cong 10 T_1$, 计数的尾数分别用 T_1 或 T_2 作钟控脉冲, 可以使常规测试 $0.1 \mu s$ 最小时间的方法提高到 $0.01 \mu s$, 最小时间提高一个数量级。

扫描电路输出锯齿波电压到水平放大至示波管, 扫描结束时还输出信号控制电子开关, 使被接收的多路信号显示在扫描线上。

自动测时时接收信号经放大后再进行全波整流, 使接收波的正起跳或负起跳均能使门限电路开始翻转, 不至丢失波形。经整流的接收波输至门限、闭锁电路, 该电路输出自动

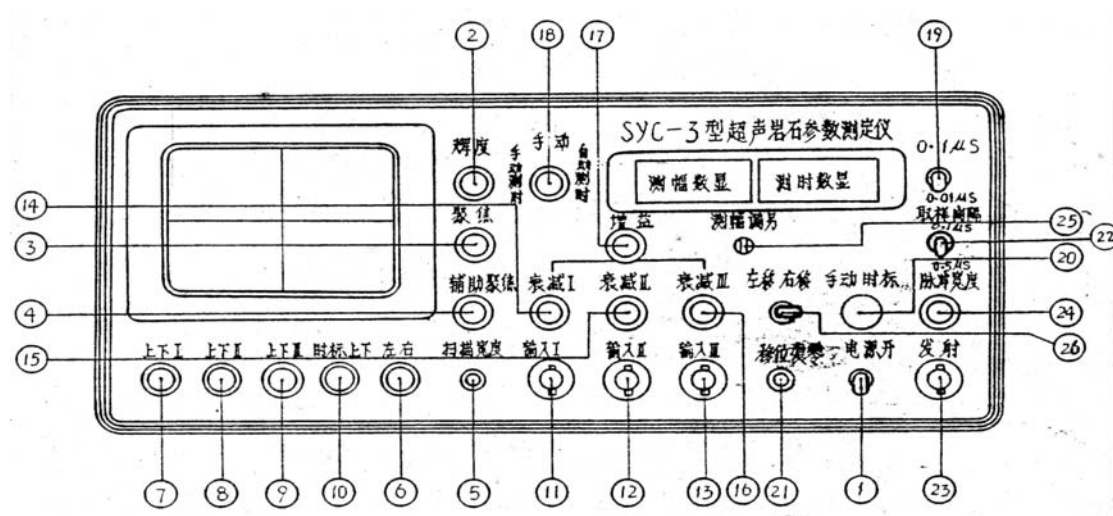
测时钟控脉冲到计数器控制电路。自动测时时，仅用于单线工作状态和 $0.1\mu\text{s}$ 挡计数，其他电路与手动测时工作状态相同。

手动测幅时被放大的接收信号经射隧将输出阻抗降低后加至取样、保持电路，由动时标控制产生小于 $0.1\mu\text{s}$ 宽的取样脉冲也加至取样、保持电路，该电路在取样脉冲到来期间，将对应的被测波形振幅值保存在保持电容上，由高输入阻抗运算放大器接成跟随器将保持电容上的电压转变为低阻抗输出后加到振幅比较器和±比较器上，同时由动时标控制的锯齿波电压加到振幅比较器和零比较器上。振幅比较器及零比较器的输出经异门后的测幅钟控脉冲的宽度仅与被测振幅的幅度呈正比关系，而与测幅的极性无关。

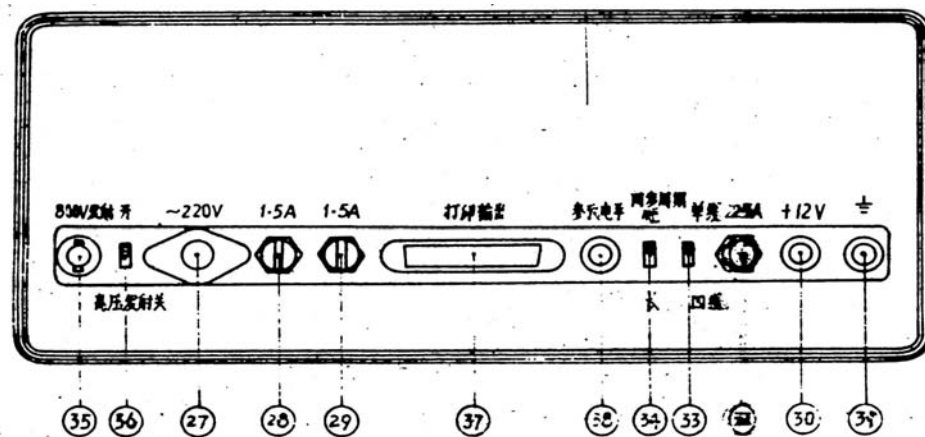
由面板上的多圈电位器及“位移、复零”等按键可调节动时标到波形上的任一位置，需要测那一点的振幅，即动时标调到那一点上。

自动测幅是按取样间隔时间自动的依次测量被测波形每一点的振幅值，并可打印记录，它的测幅原理与手动测幅的电原理完全相同，只是动时标自启动后自动移动，并依次测量相应的振幅值，动时标在每计数显示，复位这一段时间中的各个同步周期（指每扫描一次）时间中是不移动的，这样在示波器屏幕可看到稳定的并可按取样间隔时间跳动的动时标。

SYC—3仪器面板部件如图四、图五。



图四 SYC~3声波仪前面板部件图



图五 SYC~3声波仪后面板部件图

仪器前、后面板各旋钮、开关接插部分功能如下：

- 1) 电源开关
- 2) 辉度 调节示波管光迹亮度
- 3) 聚焦 调节示波管光迹清晰度
- 4) 辅助聚焦 配合③进一步调节示波管光迹清晰度
- 5) 扫描宽度 以按钮的方式改变扫描量程，每按一次，量程改变一档，量程从小到大共七挡（2、10、30、100、300、1000、3000 μs ），循环变化，注意按到3000 μs 挡时需将辉度调大些方可看见
- 6) 左右 调节扫描线的左、右位置
- 7) 上下 I 调节第一道扫描线上、下位置
- 8) 上下 II 调节第二道扫描线上、下位置
- 9) 上下 III 调节第三道扫描线上、下位置
- 10) 时标上下 调节时标上、下位置
- 11) 输入 I 接收信号第一输入插座，单线工作时，信号只能由该插座输入
- 12) 输入 II 接收信号第二输入插座
- 13) 输入 III 接收信号第三输入插座
- 14) 衰减 I 对第一通道强信号进行衰减，衰减比例见技术指标
- 15) 衰减 II 对第二通道强信号进行衰减，衰减比例见技术指标
- 16) 衰减 III 对第三通道强信号进行衰减，衰减比例见技术指标
- 17) 增益 同时调节三路放大器的增益，连续可调

- 18) 自动测时、手动、自动测幅 为仪器工作种类选择开关，由于仪器可同时显示手动测时和手动测幅的数字，因此手动测时和手动测幅两挡的功能是一样的，用“手动”表示
- 19) $0.1\mu\text{s}$ 、 $0.01\mu\text{s}$ 开关 为时间单位选择开关， $0.01\mu\text{s}$ 挡用于手动测时工作状态，另外一个功能是动时标左、右移动时， $0.1\mu\text{s}$ 挡是慢速， $0.01\mu\text{s}$ 是快速
- 20) 手动时标 调节该多圈电位器，可将动时标（尖脉冲）移动 $2\mu\text{s}$ 的范围，起微调作用
- 21) 移位、复零 种类开关18) 在自动测时的位置，按下该按钮，可起扫描延时作用，其延时速率由22) 取样间隔确定；种类开关18) 在手动的位罝，按下该按钮，可起移动动时标的作用；种类开关18) 在自动测幅的位置，按下该按钮，起扫描和动时标复零作用，不按时，动时标将按取样间隔所确定的时间自动地向右移
- 22) 取样间隔 确定自动测幅的取样间隔及其他工作状态的扫描或动时标的移动速率
- 23) 发射 100V ， $0.2\text{—}5\mu\text{s}$ 窄脉冲输出插座
- 24) 发射宽度 调节 100V 窄脉冲输出及后面板 800V 高压脉冲输出的宽度
- 25) 测幅调零 测幅数字显示零调节
- 26) 左移右移 决定波形左移或是动时标右移

以下各开关接插件在仪器后面板

- 27) $\sim 220\text{V}$ 220V 电压输入
- 28) 保险丝座 $\sim 220\text{V}$ 、 1.5A 保险丝
- 29) 保险丝座 $\sim 220\text{V}$ 、 1.5A 保险丝
- 30) $+12\text{V}$ 接线柱（红） 直流供电 12V 正极输入接线柱
- 31) \perp 接线柱（黑） 直流供电 12V 负极输入接线柱
- 32) 保险丝座 直流供电 12V 保险丝 2.5A
- 33) 单线、四线转换开关 单线或四线扫描控制开关
- 34) 同步周期 同步周期可变，余振长时可用 8ms ，余振短时可用 1ms ，又同时处于单线工作状态时，可增加亮度
- 35) 800V 发射 在较大距离测试时用该发射
- 36) 高压发射关 可开、关 800V 高压发射，即 800V 发射及前面板上的窄脉冲发射可同时发射，也可分别发射，只用窄脉冲发射时，可将 800V 发射关闭，以减小仪器功耗，用 800V 发射时，应用长（ 8ms ）同步周期，以免仪器负荷太重
- 37) 打印输出 打印时，记录信号、打印指令、回答指令输出、输入插座

38) 参考电平 为12V的参考电平, 由于+12V直流电源输入接线柱30) 内串有保护二极管, 当交流220V供电时30) 无电压输出, 故另配该+12V参考电平接线柱有+11.3V电平输出

(二) 主要技术指标:

测试种类: 自动测时, 手动测时、测幅, 自动连续离散测幅

显示方式: 单线, 四线

发射方式: 窄脉冲发射, 高压发射 (宽度可调)

读数方式: 数码显示, 固定时标

同步周期: 短 1ms, 长 8ms

声波手动测时范围: $0.3 \sim 99.99 \mu s$, $0.3 \sim 999.9 \mu s$ 两挡

测时误差: $0.01 \mu s$ 挡 $> 2 \mu s$ 时, $\Delta t < \pm 1\%$

$> 10 \mu s$ 时, $\Delta t < \pm 0.5\%$

$0.1 \mu s$ 挡 $> 20 \mu s$ 时, $\Delta t < \pm 0.5\%$

相对振幅测量误差: 在满屏内 $< \pm 2\%$

放大器输入灵敏度: $< 10 \mu v/mm$

放大器频带宽度: $50K \sim 1Mc$

放大器输入阻抗: 约 $10K \Omega$

扫描宽度: 2、10、30、100、300、1000、3000 μs

扫描延时可调范围: $0.5 \sim 500 \mu s$

窄脉冲发射幅度: 约100V

窄脉冲发射脉宽: $0.2 \sim 5 \mu s$

可控硅尖脉冲幅度: 约1000V

高压发射幅度: $> 800V$

取样时间宽度: $\leq 0.1 \mu s$

取样时间间隔: 0.1、 $0.5 \mu s$

记录讯号输出: 8、4、2、1码, 高电平+10V, 低电平为0V

指令讯号输出: T为160ms, 高电平+10V, 低电平0V

(三) 操作步骤:

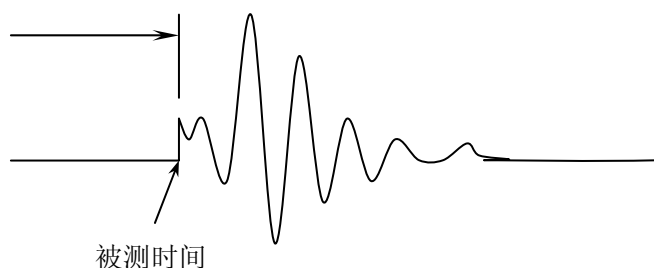
1. 手动测时:

(1) 接通电源 (220V或直流12V), 打开电源开关, 数码管亮, 稍过片刻, 调节“辉度”、“聚焦”、“上下”、“左右”等旋钮, 按动“扫描宽度”按钮, 应有一扫描线出现。

(2) 将发射换能器电缆接入“发射”插座，接收换能器电缆接入“输入 I”（或 II、III）插座，并将换能器与样品耦合好，耦合剂一般用水、黄油、凡士林等，对横波换能器则最好要用水杨酸苯脂。

(3) 将种类开关拨至“自动测幅”挡，“ $0.1\mu\text{s}$ 、 $0.01\mu\text{s}$ ”开关拨至 $0.1\mu\text{s}$ 挡，“左移、右移”开关拨至右移位置，按动“移位、复零”按钮，此时动时标扫描清零，同时将种类开关拨至“自动测时”挡，按动“扫描宽度”键，并调节放大器的衰减及增益，使波形理想的显示在屏幕上。如果需要扫描延时，把展开波形往左移、时标右移动，可按下“快移”键，并由“左移、右移”开关决定波形的左移或时标的右移，其移动速率由“取样间隔”和“ $0.1\mu\text{s}$ 、 $0.01\mu\text{s}$ ”开关控制，延时到需要的位置，手即松开，这时将种类开关拨至“手动”位置，同样按下“移位、复零”键，并由“左移、右移”开关决定波形或时标的左移或右移，“取样间隔”和“ $0.1\mu\text{s}$ 、 $0.01\mu\text{s}$ ”开关决定其移动的速度。

(4) 调节“手动时标”多圈电位器对动时标进行微调，这时数码管右窗显示数字即为被测时间数。需注意一般应将动时标调至被测点的右侧，然后再慢慢向左移，将时标前沿对准被测位置，这样时标不陡的后沿引起的波形畸变不至于干扰被测波形的识别。如图六。



图六 利用时标测量走时

(5) 数码窗右窗显示的是时间数 T_X ，包括了仪器的系统延时及换能器、耦合剂的延时 T_0 ，只有扣除了这些延时才是实际在试件中的声波走时 T ，即 $T = T_X - T_0$ 。测 T_0 时将换能器对接测时，这时应将发射脉冲宽度调至较小，放大器衰减拨至较大，以免输入信号过强使输入前放管烧坏。对于每一对换能器，测量一次 T_0 后，可记录下来不必每次都去测量一次 T_0 。

将后面板上的“单线，四线”开关拨至四线，则仪器允许三路信号同时分别输入以便进行多路测量、波形比较、同相轴测量，除了“手动测时”外，其余的工作状态（自动测时，手动测幅，自动测幅）均应工作在单线工作状态。

同步周期的使用，8ms 同步周期用于长余振的波形测量，1ms 用于高频，短余振波的测量。

发射脉冲宽度的调节：调节发射脉冲宽度，使接收波的振幅最大，余振最短为宜；有时通过调节脉宽可以观察各波组相位的变化，以利于波组初始相位的识别，测量横波时，它往往是有用的。使用横波换能器时，更显得必要。

2. 自动测时：

(1) 仪器应处于单线工作状态，按手动测时的方法调整好被测的波形，并将动时标调到被测波形前的任一位置。

(2) 将种类开关由“手动”挡拨至“自动测时”挡，不按“移动、复零”键，动时标将自动由波的初动到达时刻决定，即落在波的初动上面，离初动起跳点有一延时，加大放大器的增益，会减小该延时。

(3) 应注意只可用“ $0.1\mu\text{s}$ ”挡数码显示，动时标不可调至初至波的后面，否则显示数将由时标确定，而不是由初动来决定。

3. 手动测幅：

(1) 仪器应处于单线工作状态，按手动测时方法将波形调好，“种类开关”处于“手动”挡，将动时标调到初动的前面。

(2) 用螺丝刀调节“测幅调零”，使数码窗左窗显示为“ ± 000 ”或“ ± 001 ”。

(3) 调节动时标至所要测振幅位置，数码窗左窗显示数即为被测振幅值，满屏时，振幅值约为 ± 200 ，超出屏幕最大可测到 ± 260 。同步周期 1ms 时可测振幅的时间范围为 $0\text{—}400\mu\text{s}$ ，同步周期 8ms 时，可测振幅的时间范围为 $0\text{—}7.5\text{ms}$ 。

(4) 测幅时，往往时标前沿对准振幅最大值时，而数码管显示的数值不是最大值，在高频测量时，这一差异较明显，这是由于保持电容保持的电压为取样脉冲后沿时的振幅值，而动时标的前沿是相应于取样脉冲的前沿时刻，同时还有电路的延时，使之存在差异。

4. 自动测幅：

(1) 仪器应处于单线工作状态，按手动测时方式将波形调好。

(2) 种类开关拨至“自动测幅”挡。

(3) 按“取样间隔”开关确定所需取样间隔。

(4) “手动时标”多圈电位器调至最小，“ $0.1\mu\text{s}$ 、 $0.01\mu\text{s}$ ”开关拨至 $0.1\mu\text{s}$ 挡。

(5) 按动“移动、复零”键，检查数码窗右窗的显示数字，是否按所需间隔时间变化，若不稳定可适当调节多圈电位器，使之稳定。

(6) 接好后面板打印插座，按动“移动、复零”键，松手后即开始自动采样。

(四) 注意事项：

1. 开机后要预热烈10分钟，特别是测幅时，机器才可稳定。

2. 单线工作时，放大器只能使用第 I 通道。

3. “自动测时”，“手动测幅”，“自动测幅”时均只能工作在单线状态，以防四线干扰。
4. “自动测时”只可用 $0.1\mu\text{s}$ 测时挡。
5. 开机工作后，宜先将种类开关拨至“自动测幅”挡及“ $0.1\mu\text{s}$ ”挡，先按一下“移位、复零”键，使仪器处于初始同步状态。
6. 高频短余振测试时，宜用单线， 1ms 同步周期， 8ms 同步周期用于长余振形测量。
7. 交、直流电源不可同时接入使用。
8. 后面板“ 800V ”开关应置“关”的位置，使用时应同时将同步周期拨至 8ms 位置。
9. 调节“脉冲宽度”，使接收波形振幅最大，余振最短为宜，有时可通过调节脉宽观察各波组相位的变化，利用波组初始相位的识别，特别在测量横波时，更为必要。
10. 实验结束应该关闭电源。
11. 实验时若需快速移动时标时，可将种类开关拨至“自动测幅”挡，“左移、右移”开关拨至“右移”，这时按下“快移”按钮，时标即快速移动，松开即恢复自动移动，若要快速移动波形，要将“左移、右移”开关拨至“左移”，按下“快移”钮即可。

HF-D型智能超声仪

（一）构造原理：

HF—D型智能声波仪是由双路超声波仪器主机、计算机及打印机等组合而成的智能化仪器。其可显示单通道和双通道波形、衰减量、声时、首波幅度、频率等声学参数。波形和数据均可存储、打印。测井时可绘制深度——声速及深度——幅度曲线。该仪器可用于岩石、陶瓷、橡胶等固体介质的超声测量；检测混凝土构件、桩基的孔洞、裂缝等缺陷以进行其强度的综合评定。

其主要技术性能如下：

1. 工作频率范围： $100\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$
2. 时间测读范围： $0.1\mu\text{s} \sim 6500\mu\text{s}$
3. 时间读出精度： $0.1\mu\text{s}$ （采样频率 10MHz ）
4. 读出方法选择：手动、自动
5. T_0 消除范围： $0 \sim 200\mu\text{s}$
6. 发射电压选择： 200V 、 500V 、 1000V
7. 衰减调节范围： $0 \sim 80\text{db}$
8. 衰减步级： 1db

- 9. 波形扩展倍率：自由选择
 - 10. 采集方式：单次采样或连续采样，波形连续
 - 11. 电源：交流220V±10% 50HZ±4% 直流12V±1V
 - 12. 消耗功率：30W
 - 13. 连续工作时间：4小时
 - 14. 使用环境条件：温度0C° ~40 C° 、相对湿度小于80%、避免强电磁场干扰。
- HF-D仪器面板部件如图一、图二。

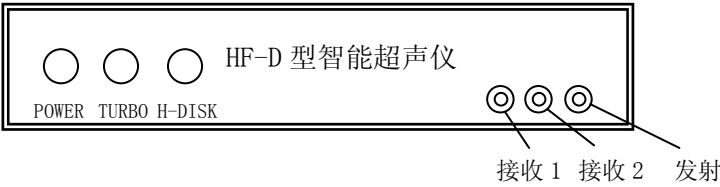
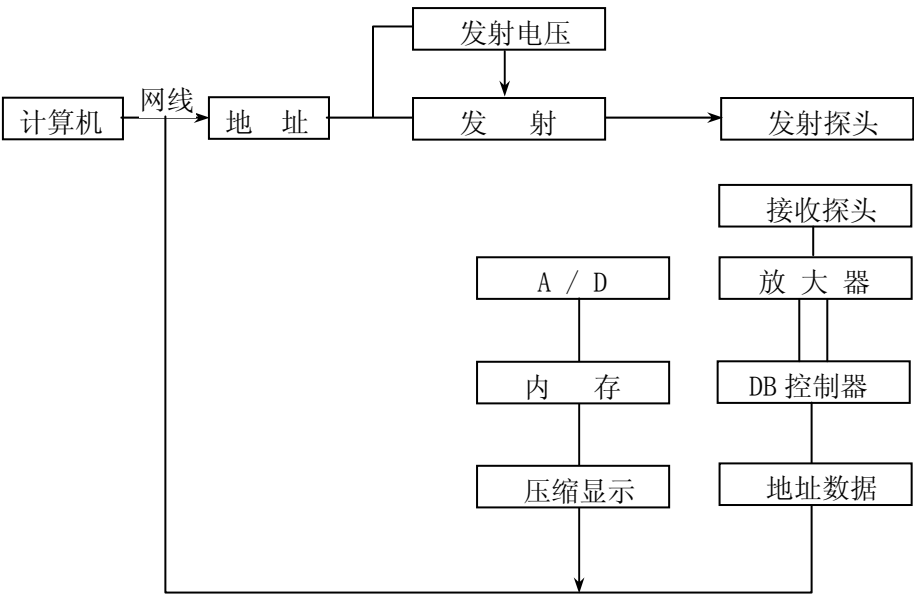


图 一 前面板



图 二 后面板

HF-D型声波仪的电气原理图：



（二）操作步骤：

一、安装程序

把光盘放入光驱后，程序会自动安装到C:\HF—D在桌面上出现名称为HF—D的图标（如果安装程序没有启动就手动执行光盘的setup.exe）。安装完成后，桌面会生成HF—D图标，双击图标就能进入超声仪操作程序(以下简称程序)。

使用程序之前，需要把计算机内的IP地址设置为 192.168.0.123，子网掩码为 255.255.255.0；方法如下：按桌面上“开始”→“设置”→“控制面板”，双击“网络连接”，双击“TCP / IP”，单击“使用下面的IP地址”将IP地址设置为 192.168.0.123，子网掩码设置为 255.255.255.0。

二、启动程序

将主机后面板网线插口上插入网线水晶头，网线另一端水晶头与计算机网口相连，完成主机与计算机的连接。双击桌面HF—D图标，运行程序(如图三)。



图 三

三、测试操作

主机面板三只换能器插口从左到右分别为一通道接收换能器输入插口；二通道接收换能器输入插口；发射换能器输出插口。按照测试的需要接好不同类型的换能器。确信接好主机和计算机之间的网线，即可开启主机电源、计算机电源（需打印时接好打印机电源和计算机之间的打印连线），双击计算机HF—D图标，点击数据采集方框，进入数据、波形显示图面。等待约20秒钟，让程序进行初始化（如图四）。

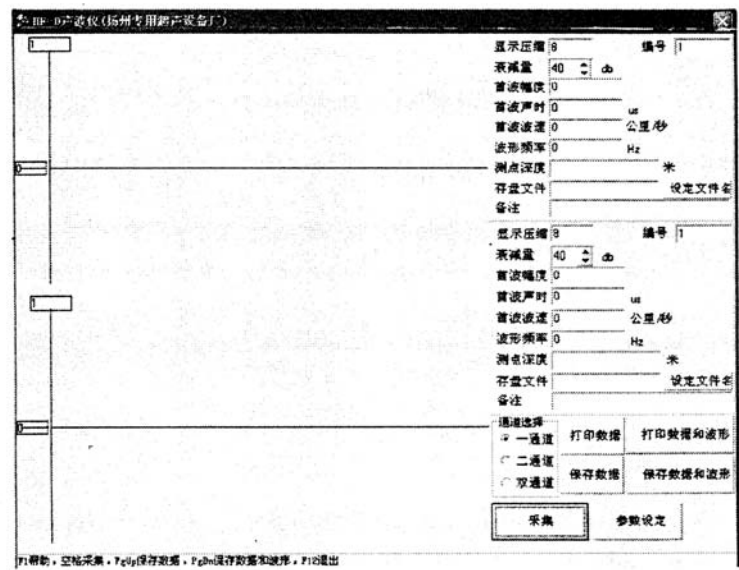


图 四

根据测试使用的换能器，确定和消除 T_0 （一发双收换能器除外）。将换能器涂上黄油或凡士林后对压紧，按击该通道衰减▲使db值从40改为75db，点击采集方框数次，获取一波形中光标的首波声时值 μS ，记住该值即为该通道的系统 T_0 值，二通道同理操作，按照测试的要求，点击参数设定方框，设定菜单内的参数（如图五）。

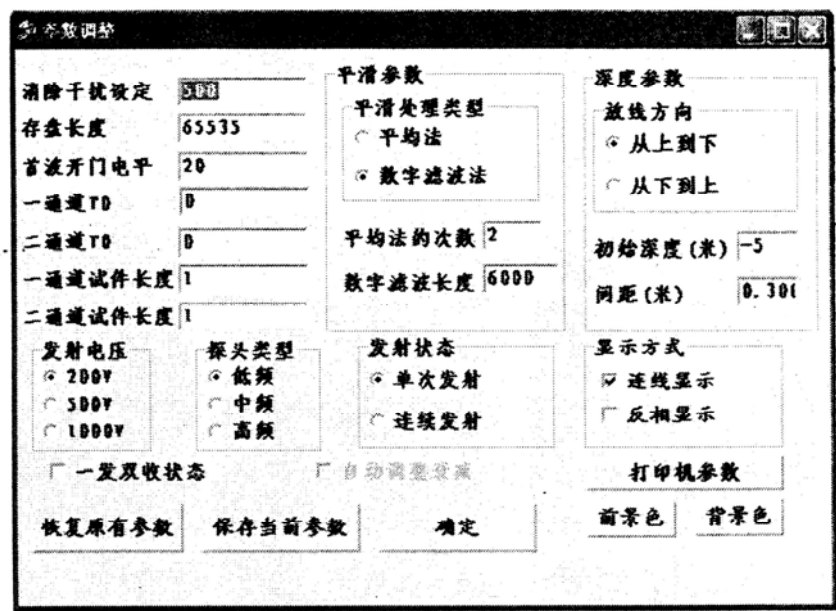


图 五

1. **“消除干扰设定”**：在测试中有时在从0点到首波起点范围内有干扰，影响自动读数，此时可以用该方法消除这些干扰。例如：首波读时在0微秒到180微秒之外，可以输入一个1750的数值在消除干扰设定的框内，这样在 0 ~ 175 微秒内的干扰将不影响仪器的正确读数（该值必须大于2微秒）。该设定在开机时设置为500，即 0 ~ 50 微秒内的干扰将不影响仪器的正确读数。当首波声时小于50微秒时，该值要调整至小于500。
2. **“存盘长度”**：在贮存波形时，我们往往不需要首波后面衰减震荡的叠加减波形，只需要首波后面的几个或几十个周期的波形即可，这样可用此程序锁定存盘的范围，少占用计算机的内存容量。设定的长度为时间 → 微秒。
3. **“首波开门电平”**：在自动测试和记录采集的数据和波形时，往往对首波的振幅有一定的范围限制，可用此值确定首波自动关门电平的确认波，即当测试首波幅度要大于该值时仪器才认定为首波。开机设定为20。
4. **“一通道 T_0 、二通道 T_0 ”**：开机时为0其单位为0.1微秒，把您测试好的 T_0 值分别输入。
5. **“一通道试件长度、二通道试件长度”**：（开机时为1）单位为毫米。（专用仪器单位为0.01毫米），把您测试的收、发换能器之间的中心距离用尺量好分别输入（即测试试件的长度）。
6. **“发射电压”**：当您测试距离加大或增益不够使用时，调整到500V或1000V。
7. **“探头类型”**：开机时为低频（100KHz以下）。中频（100KHz~500KHz）高频500 KHz以上。根据使用换能器的频率确认。
8. **“一发双收状态”**：该状态为采用一根换能器上有一发射双接收振子在同一孔中测试介质层位参数时专用。在该状态时第二通道X值为第二通道的测试点声时值减去第一通道的测试点声时值的差。
9. **“平滑参数”**：仪器设定。
10. **“发射状态”**：开机为单次发射。也可以改为连续发射。外触发空。
11. **“自动调整衰减”**：仪器设定。
12. **“深度参数”**：该程序为跨孔测桩和一发双收测孔时专用，其中放线方向从上到下和从下到上，分别指换能器上下放置的方向。从地面向下放时为从上到下。从孔底向上提升测试时是从下到上（一个发射两个接收一次性测三个剖面时使用）。“初始深度”的概念是指桩头或从地表面向下不需要测试的范围。“间距”是指换能器每次放置的距离，而两个换能器间的间隔距离输入在通道的试件长度框内，两者不同。
13. **“显示方法”**：连线显示。显示的波形是计算机连画的。当需要精确到0.1微秒测量时，可以改变成点显示。配合显示压缩为1。则光标每移动1个点。变化0.1微秒。
14. **“反向显示”**：当两换能器测试到的首波波形是负相位时。开启反相显示（因仪器自动读数首波波形为正相位）。

- 15. “打印机参数”： 开机设定为佳能80彩喷机。可以自行调整。
- 16. 前景色、背景色，开机时背景色为黄色，前景色为黑色。
- 17. 保存当前参数。参数设定不变后按下按钮保存，再确定即可。按图六菜单进行测试操作。设定完成后，点击保存当前参数。点击确定，输入参数完成。按照测试的要求放置好换能器，调整衰减量▲▼按钮，增大或减少衰减量。衰减量数字增大时接收的波形减小。反之波形增大。点击数据采集按钮两次，获取最佳的数据和波形。（如图六）

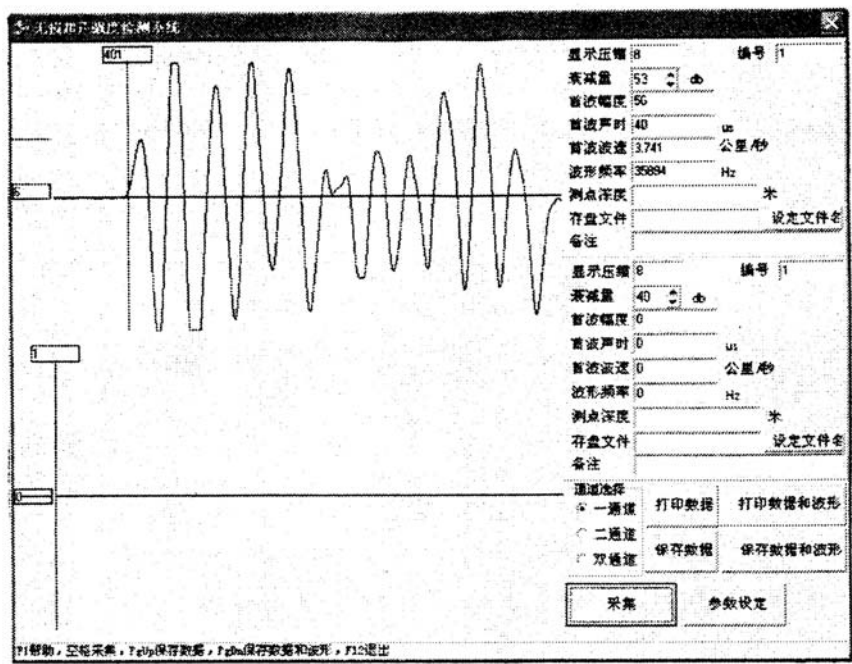


图 六

若需要存盘文件，点击设定文件名，输入文件编号，点击保存，确定文件编号，再按需要点击保存数据或保存数据和波形按钮，这样数据或数据波形即被保存，一个测点就结束。可进行下一个测点的测试，直到测试任务结束。点击关闭，退出测试菜单。

四、数据浏览与分析

点击“数据浏览与分析”，弹出图七菜单，点击打开文件。打开采集到的存盘文件，（一般在C: HF—D目录下），打开文件后就能看到左边的列表显示每个测点数据编号，移动并点击某个测点，可以看到该测点详细的数据和波形。用户可以修改方框内的数据，然后点保存。其中发射电压、显示比例、当前位置、波形存储长度不能修改。（如图七）

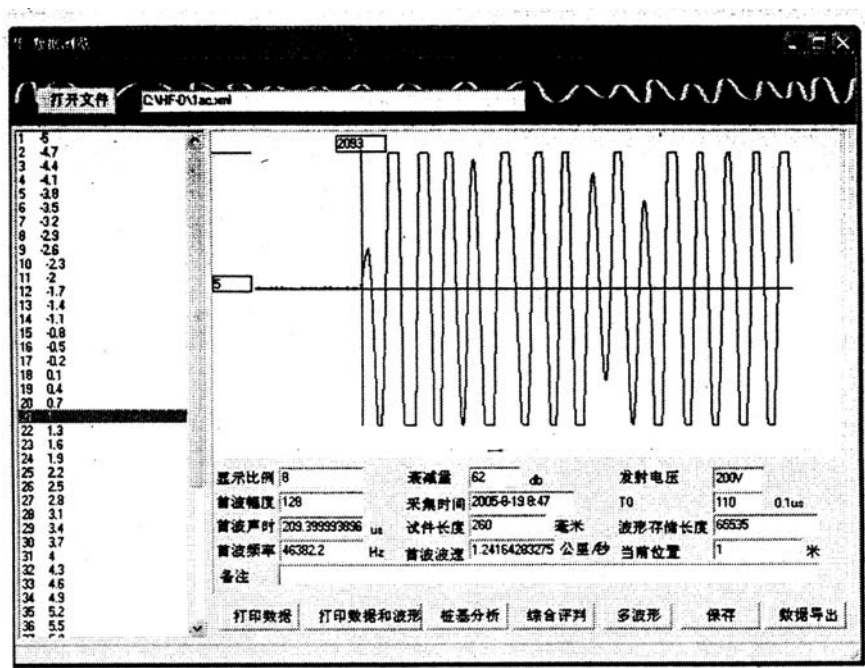


图 七

在此菜单内，用户可以根据需要进行下列操作：

- A. 用户需要打印光标指示的某测点数据或数据和波形。按下“打印数据或打印数据波形”按钮，弹出打印机设置菜单，按照您配置的打印机机型和打印范围及参数进行设置。设置完成后点击确定。打印机打印出该点的全部数据和存盘的波形。
- B. 桩基分析：点击“桩基分析”按钮弹出“桩基分析表”，其中有“数据表”和“分析曲线”。首先按下“选取剖面一数据文件”按钮，弹出存盘文件名称。点击桩基第一测试剖面文件编号，点击打开，第一剖面数据输入完成。同理点击“选取剖面二数据文件按钮”和“选取剖面三数据文件”按钮。输入整个桩基的三个测试剖面的三个数据。然后分别输入您测试的“桩基编号”、“桩径”、“桩顶标高”、“测试日期”、“设计标号”、“设计桩长”、“桩底标高”、“灌注日期”，再点击“桩基分析报表”按钮，计算机排列出三个剖面的数据表。点击下一页直到计算机绘制出三个剖面按深度排列的“深度——声速曲线”和“深度——幅度曲线”。如附后面数据表格即曲线图。若需打印，按下“打印”按钮。弹出打印机设置菜单。菜单设置后，按下“确定”按钮，打印机即可打印出您所需要的资料。

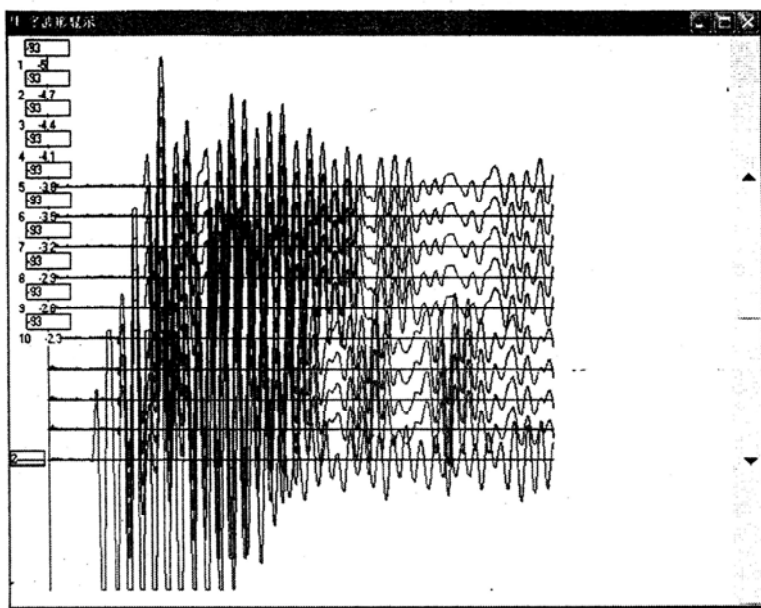
注意：

有时在输入“桩基剖面数据文件”后，计算机不能按规定显示数据或提示出错，这往往是由于测试的一组数据中某一个或几个测点数据中的声时、幅值、试件长度出现0值或负值。此时可以在数据导出的列表中首先浏览一下，记下测点编号。在“数据浏览”中进行

正确修改。

如若要对桩基剖面强度综合评判，可在“数据浏览”中打开该剖面的数据编号，按下“综合评判”按钮，即可获取该数据中的“声速最大值”、“声速最小值”、“平均声速”、“均方差”、“离散系数”、“临界值”、“强度”等综合参数。

C. 多波形：多波形分析，指对一组数据中每十个测点的波形同时在一幅图案中显示。以便观察它的首波和整个波形的规律。方法是在“数据浏览”中点击打开文件，点击所需要观察的一组数据文件编号。点击打开，再点击“多波形”按钮。即可看到该组从0到第十个测点的波形。若需要继续第十一、十二 个测点的观察，可以按右边框的▲▼钮上下移动测点数据文件。



D. 数据导出：用户可以将数据导出到excel。方法是在“数据浏览”中，点击“打开文件”后再点击需要导出的数据文件编号，点击后再点击“数据导出”按钮。在“请选择需要导出的字段”中按需要在数据框中打√。然后点击“导出”按钮，数据按顺序列表导出。操作结束后，按注意事项关闭计算机和主机，并拔下电源插座，收好换能器及配件，以便下次使用。

五、注意事项

1. 仪器时应先了解该设备的性能和操作方法；
2. 运输及使用时，应小心轻放，防震、潮、晒、冻、高温；
3. 严禁发射电压直接加入输入端，否则机器将损坏；
4. 防止电脑病毒，确保无病毒的软件才可在本仪器上使用；
5. 退出超声波仪器程序后，方可关机。或重新启动机器。开机先开主机、打印机、计算

机、关机则相反。不允许带电拔插头；

6. 请勿改动计算机内的操作程序。请勿用调试工具对软件进行分析或软件改动，以免造成严重后果；

7. 开机进入数据采集程序后，应等待20秒钟后进行采集数据。否则屏幕显示“与主机通讯失败”，此时可消除提示，若网线未联好，则提示无法消除，则需要检查网线是否联好；

8. 每次发射电压由高调低时应多采集几次以保证数据的正确性；

9. 请勿擅自拆开主机。

仪器二 LZSD-C型直流数字电测仪

（一）构造原理及特点：

LZSD-C 型自动数字电测仪有供电电流及电位差两个测量道。电流的测量是通过测量标准电阻上转换为电位差信号而达到目的。故这两道的核心电路均是高性能的 $4\frac{1}{2}$ 位数字电压表构成。其中 A/D 转换器具有测程转换、读数锁存控制，过量程及欠量程信号输出，电压欠压指示、译码及多重扫描驱动 LCD 显示器等多种功能。

1. 自动转换量程

利用 $4\frac{1}{2}$ 位 A/D 的过量程、欠量程信号以及测程转换控制功能，仪器有 200mv 与 2000mv 两个量程。在 200mv 量程的读数大于 199.99mv 时，自动转换到 2000mv 量程；在 2000mv 量程的读数小于 100.00mv 时自动转换到 200mv 量程。

2. 测量电流有六个测程

标准电阻为 0.1Ω 、 10Ω 及 $1k\Omega$ ，精度分别为 5×10^{-4} ， 2×10^{-4} 及 2×10^{-4} ，与 $4\frac{1}{2}$ 位数字表的 200mv、2000mv 自动量程转换相结合，使仪器有六个量程，其最高分辨率达到 $0.01\mu A/\text{字}$ ，最大供电电流为 5 安，使仪器既能满足低阻区大极距的测量工作，又能满足包括小距及标本的物性测定等不同的要求。

3. 有自动极化补偿的功能

仪器工作开关在“自电”位置时。能自动记忆自然电位差和极化电位差，当转换到“电阻率”位置时，即将自动减去上述直流干扰信号，实现自动极化补偿。

4. 抗交流干扰能力强

仪器采用多重滤波电路，加上 A/D 转换器的时钟电路采用 100HZ 微型石英晶体稳频，保证积分采样时间为 50HZ 周期（20ms）的整倍数对交流信号的压制作用，保证了仪器能在很强的交流干扰条件下也能正常工作。

5. 电流与电位差同步测量与锁存，测量精度高，且减少供电能耗

在电阻率测量中，每供电一次（2~4 秒）就能将电流与电位差值同步地用数字信号锁存下来，免除了两次分别测量电流与电位差时电流不一致引起的测量误差，避免了视差和读错测程产生的重大误差，且减少了供电的能耗。

6. 有极高的输入阻抗，适用范围宽

仪器设有阻抗变换器，当输入阻抗达 $30M\Omega$ 时电位差读数减小低于 0.05%，在干旱沙漠，水泥路面等接地条件很差的情况下对测量信号的影响甚微。又因具有精确测量微小电流的功能，使对高阻岩石露头测量，隧道施工质量检测，石刻文物风化程度检测的特种工

程测量中能胜任工作。

7. 自动化程度高，操作简单

在电阻率测量中，仅需要将工作开关由“自电”旋到“电阻率”位置，以定时电路为基础的自动控制电路即完成以下一系列自动操作。（1）极化补偿（2）接通 I_{AB} 测量道电源（3）接通供电开关（4）自动选定电流及电位差的测程，建立读数（5）发出锁存信号、锁定两个数字表的数字（6）切断供电开关（7）切断各通道模拟电路的工作电源。

8. 具有供电电流过流保护功能

当供电电流超过相应测量的最大值时，过流保护电路将自动关断供电电路。

9. 具有过压保护功能

当供电插孔 A 与过压保护插孔用导线连接时，大功率的压敏电阻（620v）并联于仪器供电输入端，用于吸收断电瞬间供电回路产生的高压脉冲。

10. 设有测量时间“快”、“慢”选择开关

快挡读数建立时间短，送电两秒后读数锁定，在极化稳定、交流干扰小时采用，可提高工作效率；慢挡抗交流干扰能力强，但读数时间长，送电约 4 秒后读数锁存，宜于在强交流干扰与大极距工作时采用。

11. 具有被测电位差 ΔU_M 正负极性指示功能

当 M 电位低于 N 时，读数前自动显示“—”号。

（二）仪器技术指标

1. 读数显示范围：0~19999

200mv 挡：分辨率 0.01mv / 字，读数范围 0.00~199.99mv

2v 挡：分辨率 0.1mv / 字，读数范围 100.0~1999.9mv（注：读数小于 100.0mv 则自动转换为 200mv 挡）

2. 电流测程：共分六个测程：

0.2mA 挡：分辨率 0.01 μA / 字，读数范围 0.00~199.99 μA

2mA 挡：分辨率 0.1 μA / 字，读数范围 100.0~1999.9 μA

20mA 挡：分辨率 1 μA / 字，读数范围 (0.00~199.99) $\times 0.1mA$

200mA 挡：分辨率 10 μA / 字，读数范围 (100.0~1999.9) $\times 0.1mA$

2A 挡：分辨率 0.1mA / 字，读数范围 (0.00~199.99) $\times 10mA$

5A 挡：分辨率 1mA / 字，读数范围 (100.0~500.0) $\times 10mA$ （注：电流大于 5A 将自动停止供电）

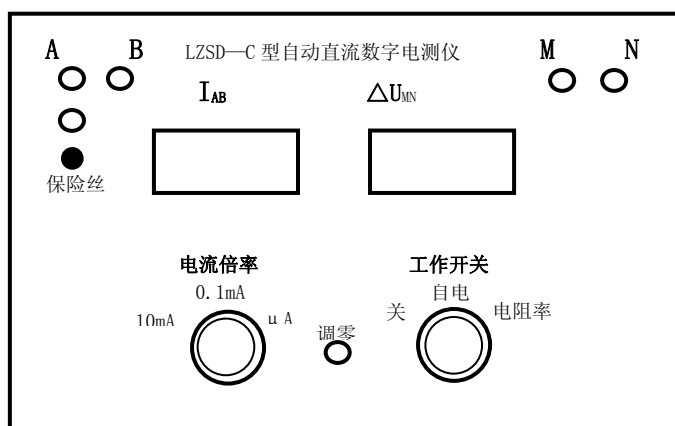
3. 输入阻抗：大于 1000M Ω

4. 对 50Hz 工频（及其高次谐波）干扰信号衰减量大于 95 分贝

5. 自动极化补偿精度：极化电位差值（包括自然电位与仪器零点）的 0.02% ± 2 个字

6. 测量精度：优于电位差与电流测量值的 0.2%
7. 电子开关控制最大功率 2.5KW（5A500V）（注：大功率电子开关极限参数为 8A1000V）
8. 内部电源平均功耗小于 50mW
9. 仪器供电接线端 A、B 与测量接线端 M、N 之间，以及它们与仪器外壳间的绝缘电阻大于 1000M Ω
10. 仪器能在-10℃到 40℃的温度范围及相对湿度小于 98%的条件下正常工作

仪器面板：



（三）操作说明

一、测自然电位

1. 将工作开关从“关”位置旋至“自电”挡位
2. 用导线短路 M、N 插孔
3. 旋动面板调零电位器旋钮至读数为零，然后除去短路线
4. 将 M、N 插孔与不极化电极连接
5. 从测 ΔU_{MN} 的液晶数字电压表上读自然电位差值（以 mv 为单位）
6. 工作完毕后将工作开关旋回“关”的位置

二、电阻率与充电法

1. 将 A、B 插孔与 A、B 供电电极及外电源串接；M、N 插孔与测量电极 M、N 相连
2. 将工作开关从“关”旋至“自电”挡位；将倍率开关旋至 0.1mA 挡位
3. 待 ΔU_{MN} 表显示的极化电位基本稳定后，将工作开关旋至“电阻率”挡位
4. 分别从左（I）、右（ ΔU_{MN} ）两只数字表上读取电流与电位差值，读数记录无误后，将工作开关旋回“自电”挡，以待测下一点

5. 当倍率开关在 0.1mA 挡位, I 表读数小于 10.00 (即 1mA) 时, 应将倍数开关旋至 μA 挡; 若读数只显示最高位 1 (或读数为零时), 表示电流已大于测程范围 (200mA), 此时可将倍率开关旋至 10mA 挡位

注: 不管倍率开关在何挡位, 当工作开关旋至“电阻率”挡位之初电流表有读数, 但很快变为零 (读数锁定后也为零), 表示电流已超过挡位测程范围 (μA 挡为 2mA; 0.1mA 挡为 200mA; 10mA 挡为 5A), 仪器过流保护电路已自动关断供电电路。应将倍率开关旋至下一高测程挡位。(10mA 挡超测程时, 应降低电池电压)

6. 工作结束, 应将仪器工作开关旋回“关”的位置

7. 工作时若发现液晶数字表左上角出现 Low Bat 字样, 则表明仪器内部 5 号电池电压过低, 应旋下仪器底部盖板, 更换 5 号电池 (5 号电池左、右各 4 只串联为一组, 那边数字表显示 Low Bat, 换那边的 4 只电池)

三、使用注意事项

1. A、B 供电电源的电压不能大于 550V, 否则将烧毁过压保护电敏电阻

2. 一般工作中, 电流倍率多使用 0.1mA 与 10mA 两挡位, 为实现过压保护, 应将插孔“A”与“过压保护”插孔用导线连接。因为压敏电阻有数微安漏电电流, 在使用 μA 倍率挡用于高阻小极距或测物性标本时, 为提高测量精度, 应取下 A 与过压保护插孔间的连接片

3. 因为 A、B 供电插孔输入端加有全波整流桥, 故可以不考虑 A、B 插孔的电压极性, 供电插头正反向插入皆可, 但切不可将供电插头插入 A 与过压保护插孔间, 以免造成输入短路

4. 仪器的接线柱, 开关等器件皆固定在具有绝缘与防潮性能的有机玻璃板上, 并与金属面板隔离, 因而仪器接线端 A、B 与 M、N 之间及它们与仪器外壳的绝缘电阻大于 $1000\text{M}\Omega$ 的指标, 若需测试按以下步骤进行:

① 将仪器工作开关置于“关”的位置

② 将 A 与 B 及 M 与 N 分别用导线短路

③ 用 500V 摇表测试接线端间与接线端与外壳间的绝缘电阻值

仪器三 液压式压力试验机

材料试验机是力学实验中的主要设备，根据加载形式的不同可以分为拉力、压力和扭转试验机，还有可兼作拉伸，压缩及弯曲等多种试验的万能试验机。在岩石力学的实验中，主要是测量岩石受压时的性质及各种参数的变化，所以我们在这主要介绍压力试验机。

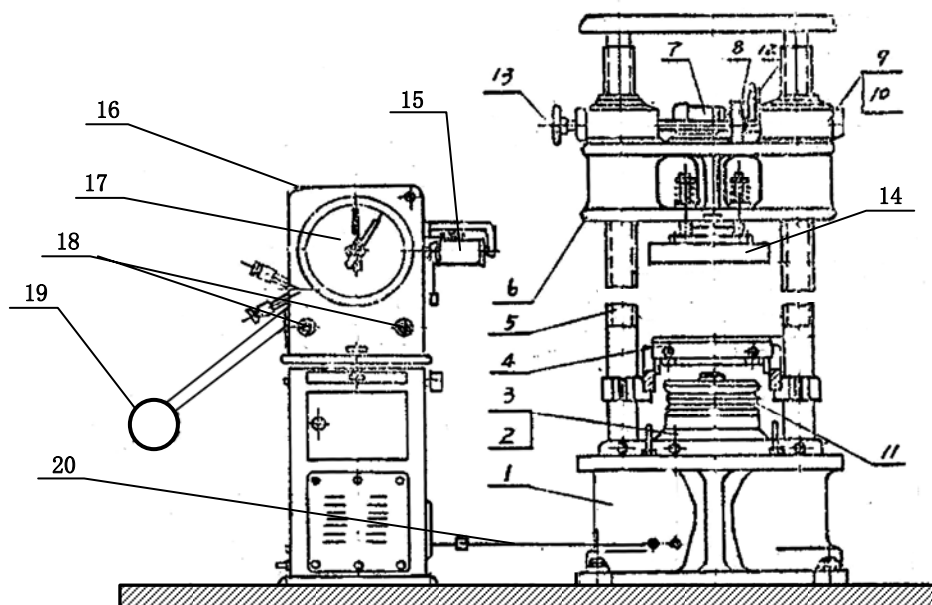
一般试验机大多由两个基本部分组成。

(1) **加载部分**：其对试件施加载荷，由油泵、油缸及上下压板等组成。(2) **测力部分**：它传递和指示试件所受载荷的大小，一般还有一自动绘图装置，实验过程中，自动绘出载荷与变形之间的关系曲线。

Y E—2 0 0 A型液压式压力试验机

(一) 构造原理：

这是常用的一种压力试验机其最大载荷为200 T（还有一种常用的Y E—5 0 0，其结构、原理完全类似，最大载荷为500 T）。这种压力试验机的外形如图一所示：



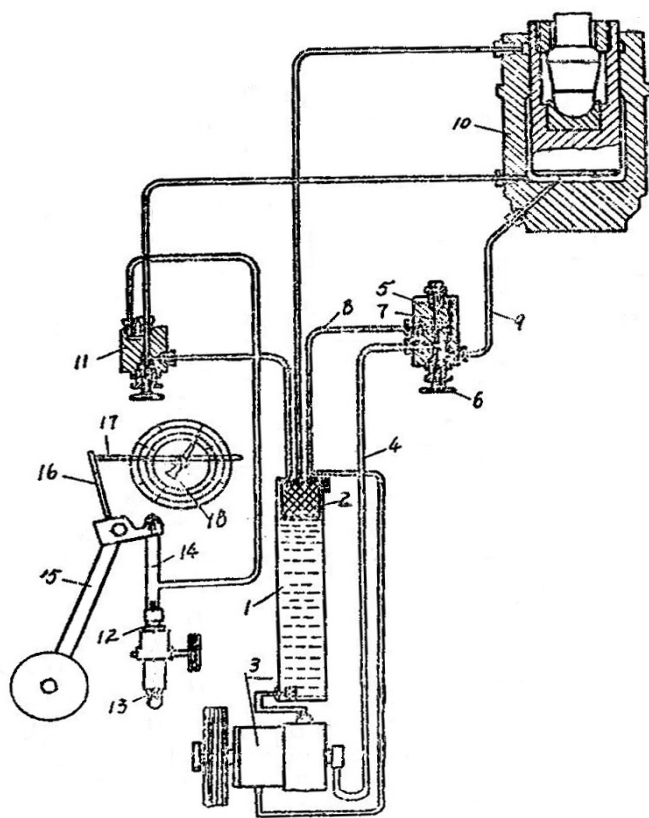
图一 试验机外型图

图中：1. 底座 2. 活塞 3. 油缸 4. 下压板 5. 丝杠 6. 横梁 7. 电动机 8. 链轮 9. 蜗杆 10. 蜗轮 11. 水平板 12. 行程开关 13. 手轮 14. 上压板 15. 记录器 16. 控制台 17. 载荷指示 18. 控制阀门手柄 19. 摆铤 20. 油管

其构造原理示意图如图二

所示：

图中：1. 油箱 2. 滤油网 3. 油泵 4. 出油管 5. 送油阀 6. 送油手轮 7. 活塞 8. 回油管 9. 送油管 10. 工作油缸 11. 回油阀 12. 测力油缸 13. 测力活塞 14. 拉杆 15. 摆杆 16. 压板 17. 推杆 18. 指针



图二 试验机构造原理图

1. 加载部分：工作油缸在机器的底座中，在底座的两侧装有两根丝杠，其支撑上部横梁及上压板并通过电机及蜗轮、蜗杆使上下压板上下移动，若作微小的移动时可使用左端的手轮进行调整。开动油泵电机带动油泵工作，将油液从油箱经油管和送油阀送入工作油缸，从而推动工作活塞、下压板上升，这时按装在上下压板间的试件即承受了压力。送油

阀用来控制进入工作油缸油量的大小，以调节加载的速率。加载时回油阀关闭。试验完毕，打开回油阀，则可将工作油缸中的油液泄回油箱，活塞下降，恢复原状，试件也即卸载。工作活塞有一定的行程限制，操作时应注意。本试验机的最大行程为 1 5 0 毫米。

2. 测力部分：当加载时，工作油缸中油压推动活塞的力与试件所受的力成正比，通过油管将工作油缸与测力油缸连通，这时油压即推动测力活塞向下移动，带动拉杆、摆杆摆铤，使其绕支点转动，同时摆杆上的压板推动齿推杆，使齿轮和指针旋转，指针旋转的角度与油压成正比，也即与试件上的所受载荷成正比，因此在测力度盘上，即可读出试件受力的大小。如增加或减少摆铤的重量，指针虽旋转同一角度，但所需的油压不同。说明指针在同一位置上，所示的载荷大小与摆铤的重量有关，一般试验机可更换三种摆铤，有三种刻度的测力度盘，分别表示三种测力范围，以保证在不同的情况下测量载荷的精度。在

试验机分别有 0—50 T，0—100 T，0—200 T 三种度盘。其分度值分别为 10 kg / 格，200 kg / 格，400 kg / 格。

(二) 操作步骤:

1. 检查各阀门是否处于关闭位置。
2. 对所要做试验的最大载荷估计，以便选用相应的测量范围，得到准确的数据。并同时调整缓冲阀手柄以使相应的测量范围对准标线 A、B、C 以保证卸载或试件破裂时使摆砰缓慢落回避免撞击机身。
3. 根据所选测量范围悬挂相应的摆砰，摆砰共有三个，分别刻有 A、B、C 字样，A 砰固定在摆杆上，试验时按下表规定加上摆砰即可。

摆 砰	A	A + B	A + B + C
测量范围	0~50 T	0~100 T	0~200 T

4. 装好自动绘图仪的传动装置，笔和纸或与其它测力仪器的连接。
5. 开动油泵电机，检查运转是否正常。然后打开送油阀，使活塞缓慢上升，顶起下压板约 10 MM 左右，以使指针对准零点时将活塞以及它所带起下压板试样等的重量消除。将送油阀关至最小。若指针不在零，可调整齿推杆螺丝，将指针调至零的位置。同时将随动指针也调至零点。加载时测力指针带动随动针一起转动。当卸载或试件破碎时，测力指针迅速返回，而随动针则停留不动，示出此时的最大载荷值。
6. 试样直接放置在下压板上，下压板上有标线，以便试样放置时对准中心。
7. 降下上压板至试件顶端 2 MM 左右处，再转动手轮使上压板与试件顶端接触。上压板不可下降过快，以免冲击试件。
8. 打开送油阀，开始试验。打开送油阀时应根据试验要求的加载速率，不可开得过大，使试样受到冲击力，亦不应骤然无故关闭，使试样所受载荷突然下降，因而影响数据的准确性。
9. 试样破碎或试验完毕，关闭送油阀，然后缓慢打开回油阀使油缸内的油回到油箱，下压板回复原始位置，升起上压板，取出试件。

(三) 注意事项:

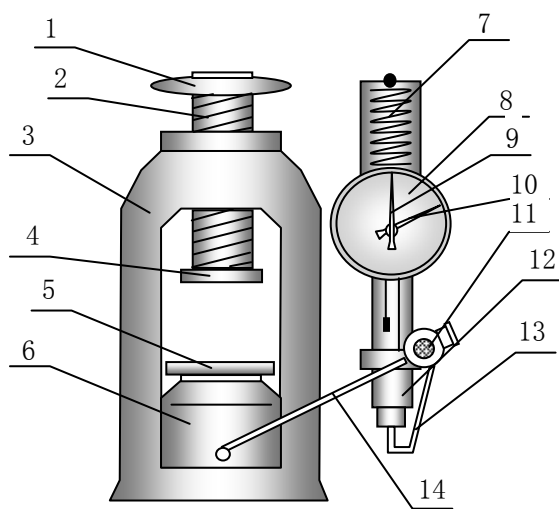
1. 开车前及停车后，送油阀必须置于关闭位置。加载，卸载和回油必须缓慢进行。
2. 加载时回油阀必须关紧，以免有油漏回。注意送油阀关闭时，不可拧得过紧，以免损伤油针尖稍。

3. 若在试验过程中，油泵突然停止工作，此时应将负荷卸去使油压降低。重新启动油泵试验时，不应在高压下起动，以免发生意外。
4. 机器开动时，不得擅自离开。实验过程中不得触动摆砣。
5. 使用时听见异声或发生任何故障应立即停车。
6. 清扫试验台，以免试验机上残留碎石粉尘，损坏部件。

NYL—200D型压力试验机

（一）构造原理：

压力机外形如图三所示。



图三 NYL—200D型压力试验机外型图

图中： 1. 压力手轮 2. 压力螺杆 3. 压机框架 4. 上压板 5. 下压板 6. 压力油缸 7. 测力弹簧 8. 测力指示刻度盘 9. 测力指针 10. 读数指针 11. 控制手柄 12. 油泵 13. 回油管 14. 进油管

其构造原理基本与YE—200A压机相同。其活塞最大行程为200MM。其不同的是测力活塞移动时不是带动拉杆，而是拉伸弹簧，同样的力对不同粗细的弹拉伸长度不同，以示不同的测力范围。本机备有500及200公斤两只弹簧。500Kg粗簧为0—200T，1000kg/格，200kg细簧为0—80T，500kg/格。

另外，我们现将弹簧的拉伸与一位移传感器连接，当施加不同的载荷时，弹簧被拉伸不同的长度，传感器输出一随之变化的电压信号，送至X—Y记录仪上，便于记录载荷的变化。

（二）操作步骤及注意事项：

基本与YE—200A型试验机相同。

仪器四 电阻应变仪

电阻应变仪是一种广泛用于测量应变的电子仪器。它对由电阻应变片随所测物体的应变转换的电阻变化率进行测量，最后用应变的标度指示出来。

一般应变仪可按所能测应变的频率（即工作频率）分为：（1）静态电阻应变仪，用于测量静态应变；（2）静动态电阻应变仪，用于静态或频率在200赫之内的单点动态应变测量，其基本是静态的，（3）动态电阻应变仪，用于测量5000赫以下的动态应变；（4）超动态电阻应变仪，用于测量工作频率上限达几十千赫的动态应变，多用于爆炸、高速冲击等瞬态应变测量。

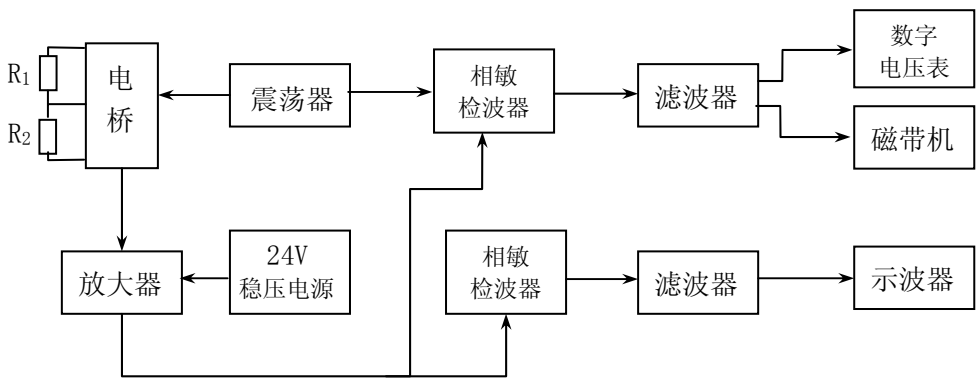
Y D—15 动态电阻应变仪

（一）构造原理：

应变仪利用贴在试件表面的电阻应变片，当试件受到外力变形时，使应变片长度相应地变化 ΔL ，应变片的电阻值变化 ΔR ，这种变化关系在一定范围内近似线性。应变仪测出应变片电阻值的变化 ΔR ，标定出相应的应变 ε 。上述机械量转换为电量的关系，称为电阻应变片的“应变效应”，用电阻应变片的“灵敏系数” K 来表征。

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / l} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}$$

Y D—15 动态电阻应变仪采用载波单桥工作原理。其方框图如图一所示



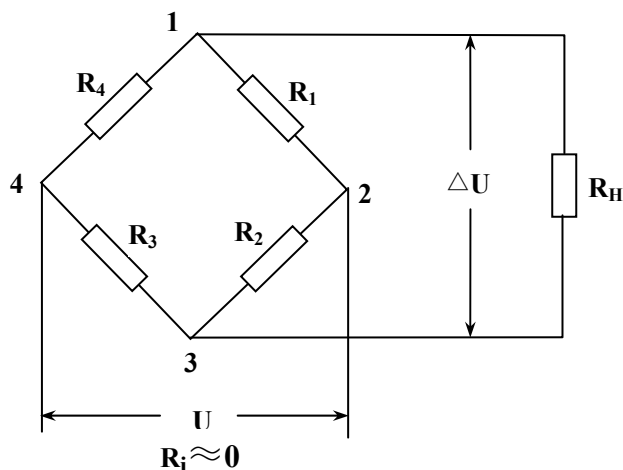
图一 YD—15动态电阻应变仪工作原理

其低阻输出，输出电流，配用光线示波器；高阻输出，输出电压，配用磁带机、电压表、记录仪等。

(1) 电桥：根据动态应变测量特点采用载波单电桥。其按 $120\ \Omega$ 设计，图一中画的为半桥测量，其中 R_1 为测量片， R_2 为补偿片。在电桥盒内有两个 $120\ \Omega$ 的精密无感线绕电阻，作为半桥测量时的内半桥，全桥测量时则将这两电阻断开。电桥的电源对角线，电振荡器供给稳定的 10 千赫载波电桥电压，为非对称联接，而电桥的测量对角线则对称联接，以减少外界的干扰。在无信号时，用电阻和电容预调平衡装置将电桥预调平衡，测量对角线无电压输出。当试件受力而变形时，由“应变效应”而引起作为桥臂电阻的电阻应变片阻值变化 $\Delta R/R$ ，破坏了电桥的平衡，测量对角线出现电压 ΔU 。

取 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，应变时，应变片有增量 ΔR ，如图二所示， ΔU 为 1、3 间的开路电压

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



图二

$$\therefore \Delta U' = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \cdot U$$

当 $R_H \gg R$ 等（桥路等效电阻）时

$$\Delta U = \Delta U' = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \cdot U$$

当电阻应变片为压缩时，

$$\Delta U = \frac{\Delta R}{4R - 2\Delta R} \cdot U$$

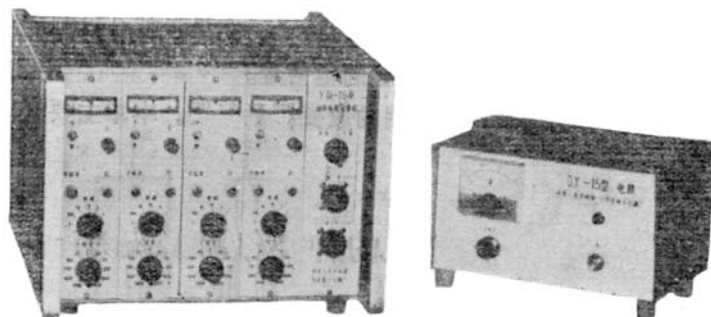
(2) 放大器：由于测量应变片的电阻变化 $\Delta R/R$ 非常小，电桥的输出电压 ΔU 也很小，需用高放大倍数的放大器将此极为微小的信号加以放大。本放大器由射极输出，电压放大，功率放大及深度交直流负反馈组成。

(3) 相敏检波器：从放大器输出的信号中检取应变信号，采用电桥调制和负载相对应的低阻相敏检波器来鉴别被放大的应变信号的大小及方向。

(4) 滤波器：用 π 型低通滤波器，使工作应变频率通过，而对载波频率及二倍载波频率全部衰减很大，使经滤波后能得到纯粹动态应变的波形。

(二) 主要技术指标：

YD—15型动态电阻应变仪外型如图三。



图三 YD—15动态电阻应变仪外型图

1. 测量通道数：8道
2. 应变测量范围：0— $\pm 10000 \mu\epsilon$ （微应变）
3. 标定应变： ± 50 ， ± 100 ， ± 300 ， ± 1000 ， $\pm 3000 \mu\epsilon$ ，标定误差不得超过 $\pm 1\%$ 。
4. 灵敏系数： $K=2.00$
5. 灵敏度： $0.025 \text{ mA} / \mu\epsilon$ （ 20Ω 负载） $0.01 \text{ V} / \mu\epsilon$ （ 1 K 负载）
6. 电阻应变片：按 120Ω 设计， $100—600 \Omega$ 可使用，
7. 线性输出范围0— 30 mA （ 12Ω 及 2Ω 负载）0— $\pm 1 \text{ V}$ （ 1 K 负载）
8. 振幅特性误差，低阻输出不超过 $\pm 1\%$ ，电压输出不超过 $\pm 2\%$

9. 工作频率范围：0—1 5 0 0 H Z

1 0. 电桥电源：1 0 K C，标称电压 3 V

1 1. 电阻平衡范围：不小于 $\pm 0.6 \Omega$ （指 1 2 0 Ω 应变片）

1 2. 电容平衡范围：不小于 $\pm 2 0 0 0 P f$ （包括桥盒内 1 0 0 0 P f）

1 3. 衰减误差 1，3，1 0，3 0，1 0 0 五档，误差 $\leq \pm 2 \%$

1 4. 稳定性，预热 1 小时后，零点漂移 $\leq \pm 5 \mu \varepsilon / 2$ 小时

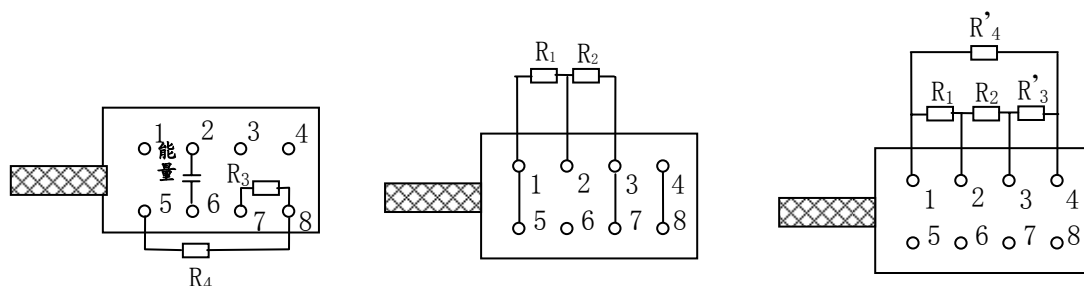
灵敏度变化 $\leq \pm 1 \%$ / 半小时

1 5. 电源，输入 / 2 2 0 V，5 0 H Z，低压输出，直流 2 4 V，2 A。

（三）操作步骤：

1. 准备工作：

（1）电桥盒的联接：电桥盒内有两个 1 2 0 Ω 无感线绕电阻 R_3 和 R_4 及一个 1 0 0 0 P 云母电容 C_0 。如图四 a 所示。 R_3 、 R_4 作为半桥测量时的内半桥，在长导线测量时，当前面板上的“电容平衡”调节范围不够时，可用导线联接“1”—“6”或“3”—“6”接线柱。作半桥测量时，按图四 b 接线， R_1 为工作电阻应变片， R_2 为补偿片，接线柱“1”和“5”，“3”和“7”，“4”和“8”分别短接，这时试件受拉伸的有正应变，压缩时有负应变。全桥测量如图四 c 接线。除去各接线柱间短接片，使 R_3 和 R_4 与测量桥断开。 R_1 和 R_3 为工作片， R_2 和 R_4 为补偿片。



图四 电桥盒接线图

（2）仪器的联接：a、将电源线的三芯插头插入 DY—1 5 电源背后的“输入”插座内并旋紧。打开“电源开关”，用欧姆表检查电源输入端有无短路和断路，如果正常，关掉“电源开关”。接通电源（2 2 0 V、5 0 H Z）重新打开电源开关，电压表应指示 2 4 V。再关掉开关，将应变仪用联接线与 DY—1 5 型电源输出联接起来。b、将粘贴在试件上的电阻应变片通过联接线别到相应的电桥盒接线柱上；电桥盒的另一端的插头分别插入应变仪后面板下部的“输入”插座内旋紧。c、将输出线一端的二芯插塞，分别插应变仪后面板上的相应插口中。使用 X—Y 记录仪或磁带记录仪时插入“电压输出”插口，另一端

接线叉红柄为正，黑柄为负，接到X—Y记录仪上，使用光线示波器时，插入“低阻输出”插口，另一端接线叉接到示波器相应输入端，这时应变仪“输出”开关应放在适当位置上，如表一所示。d、接线后，开启电源前，检查下列开关位置：电源箱“电源开关”在

振 子	FC6~5000	FC6~2500	FC6~1200	FC6~400
挡	12	16	20	50

表一

关位置；应变仪各放大器面板上的“衰减”开关在“0”，“标定开关”在“0”，后面板“输出开关”放在所需振子阻抗上。

2. 预调平衡：

（1）打开YD—15电源的“电源开关”，指示灯亮，面板上电压表，指针应稳定在24V上。（2）观察面板上输出表是否指零，若不指零，可调节“低阻基零”电位器。同时用万用表测量“电压输出”的输出电压，若不指零，可调节“电压基零”电位器使之满足。（一般情况下，该项已调好，用者不需调节）。（3）将“衰减”开关依次转列“100”，“30”、“10”“3”“1”挡，同时转换“预静”开关列“静”、“予”位置，分别反复调节“R”和“C”，“静时调R，予时调C，使输出指示表在“静”和“予”位置都指零。调好后开关掷于“静”位置。

3. 仪器使用：

（1）予热30分钟后各放大器再预调平衡一次，若使用光线示波器，“输出”开关按表1放在适当位置上。（2）根据被测应变大小，选择适当的“衰减”挡。我们的实验中一般使用“30”挡为宜。（3）在所选的衰减情况下，施加相应的标定信号，以便衡量被测应变信号的大小。用“标定”开关给出相应的标准应变，观察在X—Y记录仪上的标度大小是否理想，可以调节放大器面板上灵敏度调节电位器，使之满足。在记录仪上记下标准应变尺度。（4）标定后将标定开关掷零即可进行测量。

（四）注意事项：

1. 电桥盒上导线连接时，接线柱必须拧紧，联接导线应用同一型号，同一规格的金属屏蔽线，相互间无相对移动。

2. 使用不同灵敏系数电阻应变抗时须修正。用YD—15应变仪的灵敏系数按 $K = 2.00$ 设计，使用应变片也应为 $K_0 = 2.00$ ，若其是其它灵敏系数，读数需按下式修正：

$$\varepsilon_n'' = \varepsilon_{max} \frac{K_0}{K_n}$$

K_0 应变仪灵敏系数 ($K_0 = 2.00$) K_n —使用应变片灵敏系数, ε_{max} 应变信号最大值, ε_n'' 按灵敏系数修正的应变值 ($\mu\varepsilon$)

3. 仪器内标定应变按 $120\ \Omega$ 应变片设计。使用不同应变片进行全桥测量时, 需用外接标定。

4. 试验完毕, 关闭所有开关, 衰减开关掷, 并将全部联接线拆除, 盖好仪器。

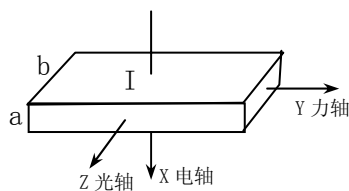
仪器五 压电换能器

（一）原理：

一八八零年居里兄弟发现了某些晶体的压电现象，即某些晶体在结构上具有一定的不对称性，当它在一定的方向上受到电压的作用时，便可产生形变；反过来若将晶体在同样方向上使其产生机械形变时，则在对应的方向上产生一个电压。反转所加的应力方向，则产生的电荷符号也相反。这即是所谓的“正压电效应”（机械能转换为电能）和“逆压电效应”（电能转换成机械能）。利用这些效应，制成了超声换能器。首先由一系列的电路产生高频电脉冲，去激发压电晶体，使之产生机械波，从而推动模型介质向外辐射超声波。接收换能器与此相反，在模型介质中的超声波的推动下，换能器发生机械振动并转换成电磁讯号，经放大处理后进行显示或记录。

通常我们把换能器也称为“探头”，相对于实际的应用，发射“探头”即相当于震源，而接收“探头”则相当于拾震器或检波器。

晶体的排列有一定的方向性，一个晶体的坐标为光轴（Z），压电轴（X）和机械轴（Y）。当由机械作用在压电轴（极轴）的两端时，产生最大电荷，因此我们制作压电晶片时，所切的平面即要垂直于压电轴。如图一：



图一 压电石英片内各轴的取向

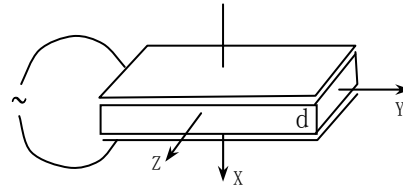
当我们在压电晶体片上施加交流电场时，电场的方向与压电轴一致，晶体将按电场的相位交替地以同样的周期压缩、伸长，即弹性振动，当电场的频率与晶片的振动固有频率相等时，其振幅达最大值。

如果我们忽略横向压缩引起的横向振动，即当晶片的厚度大大小于面积时，其基本振动固有频率可近似为

$$f_n = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}$$

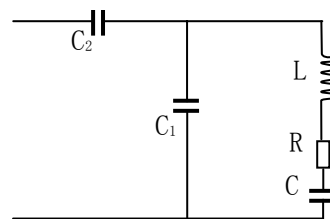
式中 h 为晶片厚度（cm）， ρ 晶片密度（g / cm³）， C_{11} 相当于该种振动的形式和取向的弹性模量（达因 / cm²，1达因=10⁻⁵牛顿）如石英 $\rho=2.65$ 克/厘米³， $C_{11}=86.05 \times 10^{10}$ 达因/厘米²， f_n 的单位为Hz。

若我们需激发横向剪切振动时，可利用沿 Y 轴取向的晶片就可达到目的，加于晶片表面的电场垂直于晶片的压电轴，则仅能激发剪切形变 X_y 。



图二 压电晶体在激发电极间取向

压电晶体的等效电路，由电阻、电容、电感组成，用其代替石英晶片分析问题。理论的计算，可以说明，如图三所示的电路表示晶体的振动情况是正确的。



图三 压电石英的等效电路

目前我们大量采用的换能器是由锆钛酸铅压电陶瓷（PZT）制成的。其机械品质因素 Q_m （即谐振时由于材料的内摩擦而产生的机械损耗，压电元件振动时克服摩擦而消耗能量， Q_m 与机械损耗成反比）一般可在50~300之间，居里点在300℃~400℃之间。机电耦合系数 K 是反映材料性能的重要参数之一，它表示压电材料的机械能与电能的相互耦合效应，其定义为

$$K^2 = \text{通过逆压电效应而转换的机械能} / \text{输入的电能}$$

或

$$K^2 = \text{通过正压电效应而转换的电能} / \text{输入的机械能}$$

由于压电元件的机械能与其形状及振动方式有关，因此不同形状和不同振动方式所对应的机电耦合系数也不相同。

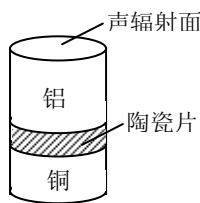
压电材料的介电常数、介质损耗、弹性常数、机械品质因数、压电常数、机械耦合系数等对换能器的发射功率、接收灵敏度、谐振频率、阻抗等重要性能指标有着直接关系。

压电换能器的主要性能指标有工作频率和频宽、指向性、阻抗、发射功率和效率、发射灵敏度及接收灵敏度和振幅特性等。

换能器的工作频率影响着其它性能指标的变化，在使用中我们要根据不同的需要来选择换能器的频率。对于发射换能器，一般工作在其谐振基频左右，以获得较满意的波形和效率；而对接收换能器则要求有较宽的频带和较低的噪声；指向性是换能器的重要指标，它直接影响实验的作用距离及定向精度；发射换能器相当于一输入阻抗，可由阻抗电桥测得，接收换能器等效于输出阻抗，其要与发射机的输出回路及接收机的输入电路相匹配（一般在几欧至几千欧）；功率是发射换能器在单位时间内向介质声场辐射多少能量的物理量，功率越大，讯号传得越远。

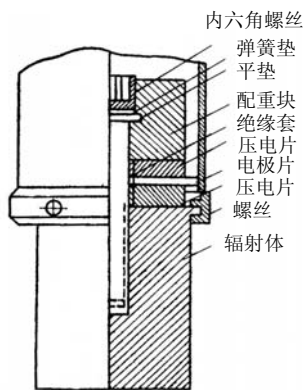
（二）结构：

我们大部分使用的厂家生产的换能器为夹心式压电换能器。其结构示意图如图四：



图四 夹心振子结构示意图

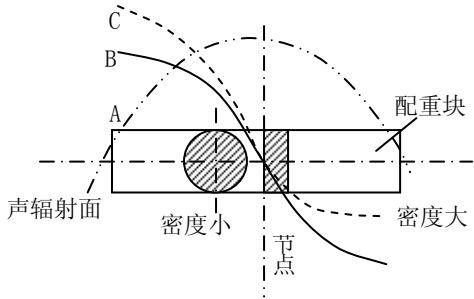
我们称这种在陶瓷片两侧加金属块的圆柱体为“夹心振子”，其厚度（包括金属柱）为基波的半波长。换能器的整体结构如图五。



图五 夹心换能器结构示意图

在两陶瓷片之间夹一电极，陶瓷片上侧的金属块称为配重块，下侧的金属块称为辐射块，上下用螺丝拧紧。如采用并联结构，则压电陶瓷接触配重块及辐射块两侧均为负极，接触电极一面均为正极，辐射体用铝轻金属，配重块用45#钢。

图六所示为夹心振子的单轴辐射特性图。曲线A表示应力或应变，在节点处有极大值，

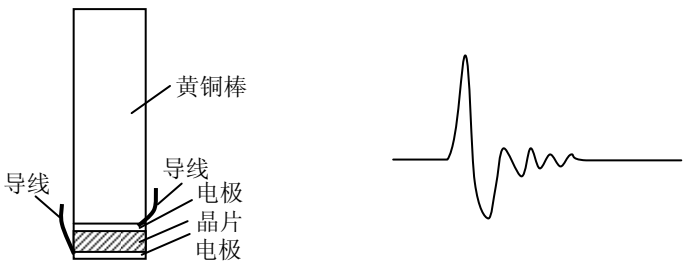


图六 夹心振子单轴辐射特性示意图

当负载质量相同时，振幅可以曲线B表示；密度不同时，振幅如曲线C变化，此时振幅的极大值出现在小密度材料的一侧。可是辐射功率在两个振动面上分布不对称，配重侧产生的声能大大减少，而在辐射面上产生的声能相应增加，从而基本上实现了单面辐射。

其它各种类型的压电换能器还有许多，如横波换能器、抗压换能器、弯曲式换能器、增压式换能器、高频换能器、碗型聚焦换能器、球型换能器等等，这不一一列举。

杆状换能器是一种结构简单，容易自制的换能器，可以得到波形简单，延续时间短的子波，是一种宽带窄脉冲的换能器，尤其应用于超声地震模型实验中，以便更好地分辨各类震相。其结构如图七所示。杆状换能器制作工艺很简单，用环氧树脂将两薄铜片粘结在陶瓷晶片（锆钛酸铅压电陶瓷）的两个镀银面上，胶干后，再将黄铜棒与其粘结起来作为背衬，焊接好电源引线即可。这里选黄铜棒，是因其声阻抗与锆钛酸铅的声阻抗接近，声



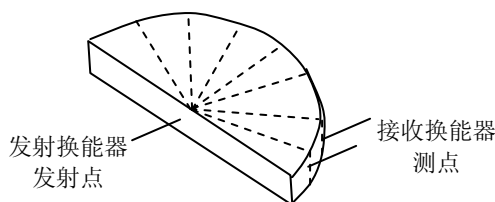
图七 杆状换能器结构及波形

脉冲形状最简单。但这种换能器也存在发射功率小、接收灵敏度不够高等缺点。

(三) 换能器特性测定简介:

换能器的特性主要指其指向性、阻抗、固有频率、压电参量等。

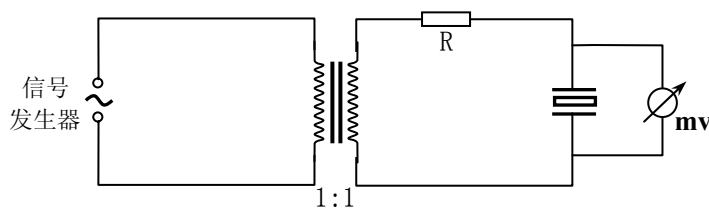
1. 指向性: 如图八在一二维半圆的均匀介质模型上, 把发射换能器放在圆心部位, 把接收



图八 换能器的指向性测定

换能器放在按一定分度的圆周测点上, 观测各点震相的震幅, 将记录数据绘制在坐标上, 按照最大响应的声功率的一半 (或0.707) 求出发射换能器的指向角 (开角)。对于接收换能器可用同样的方法测定。

2. 阻抗: 串联谐振法是阻抗测试简便易行的方法。原理如图九, 信号发生器的交变信号经1:1变压器加在电阻 R (几百 Ω 至十几 $K\Omega$) 和待测的换能器串联的电路, 毫伏表起电压指示作用。调节信号发生器的信号频率, 使毫伏表的指针达到极小值, 记下此值,

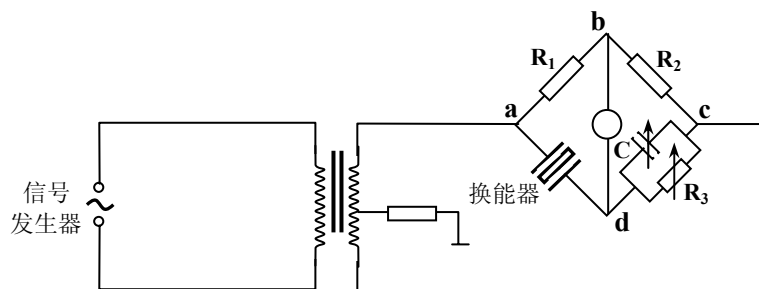


图九 串联谐振电路

并保持不变。用标准电阻箱代替换能器, 改变其阻值, 使毫伏表指针达到同样极小值, 此时电阻箱的阻值即近似等于换能器的阻抗。

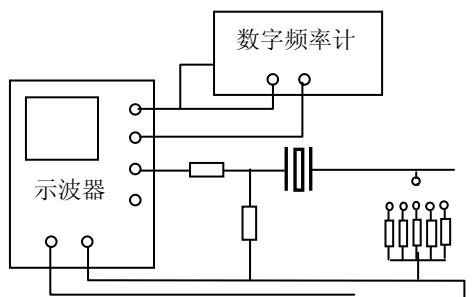
3. 固有频率: 常用方法为电桥法, 其原理如图十所示。信号发生器的交变信号经变压器加至电桥 a 、 c 端, R_1 , R_2 为标准电阻, 可取 $R_1=R_2$, R_3 、 C_1 为标准电阻箱和电容箱, b 、 d 跨接的毫伏表作为指示用。在某一频率下, 调节电阻箱和电容箱, 可使毫伏表指针达极小值, 记录下此频率下的 $1/R$ 及 $1/C$, 改变至另一频率, 重复上述的过程, 得到另一组 $1/R$

和 $1/C$ ，多次重复，即可作出频率与 $1/R$ 的曲线，其 $1/R$ 取极大值时所对应的频率值，即为换能器的谐振频率 f_0 ，与其对应的 $1/R_0$ ， $1/C_0$ ，为此时换能器的电导及电纳值。



图十 电桥法测固有频率

在实验室也可用扫频仪、数字频率计进行测量，可从扫频仪屏幕上直接观测到压电陶瓷换能器的整个频谱特性，用扫频仪的手控扫描，可由数字频率计显示任意频谱特性曲线上一点的频率数值。



图十一 数字频率计测量频谱特性

换能器的研究是一门十分广阔而又深奥的科学，在此仅是一点粗浅的介绍，使我们有一点初步的认识。

仪器六 应变片式传感器

在我们岩石力学实验中，除了直接测量岩石样品在不同受力状态下的应变外，还需要根据实际情况测量其所受到的载荷、压力、位移等等，这时我们就要广泛地使用到各种应变片式传感器，结合电阻应变仪去测量这些参数。

应变片式传感器，按其用途大至可分为荷重、拉压力、压力、位移等传感器（位移传感器我们在介绍引伸仪时已介绍）。这几种传感器的核心部分是一个弹性元件，在这个元件上的适当部位贴上应变片，根据实验的不同需要，安置在不同的位置，弹性元件受到力的作用，产生变形，再根据标定的其应变与受力的对应关系，以获得测量所受力的数据。

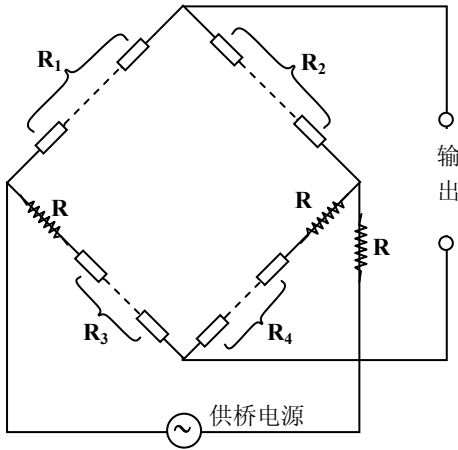
由于传感器是参数的测量仪器，因此要求要有较高的精度和灵敏度（一般为3~5%或1~0.01%），在不同的环境下要有较好的稳定性，而且要求体积小，重量轻。这些要求主要都是对于弹性元件提出的，因此在弹性元件的选材与处理上都有一定的讲究。因为是根据弹性元件的应变来测量力的变化，因此元件的应变分布要均匀，变化梯度小，变化有线性关系，且要有足够大的数值，以使传感器得到较大的电信号输出。要求弹性元件的材料具有较高的强度，韧性，弹性滞后小，抗疲劳性好，为了保持线性，弹性元件的允许应力一般选其强度极限的1/3~1/4。

鉴于这些要求，现在一般选材有30CrMnSiNiA，40CrNi，40CrNiNo等高级调质钢，也可用40Cr，60Si2Mn，50CrV，40CrMnMo等。在制造工艺上也有一定的规范要求。首先要退火处理，以便于切削加工，加工时进刀量要小，以减小其表面的加工应力，然后进行热处理，提高其强度，减小滞后和蠕变，增加工作的稳定性。精加工时，磨削量也要小，消除加工时的残余应力，提高测量精度，最后进行时效处理，加热至160~180℃，保温度12小时，反复三次。当然对于某些特殊要求的元件，还要进行特殊的处理。

因为对于传感器的精度要求较高，而且长期反复使用，所以对贴片的选择、粘贴、固化、防蛀等也都要求十分严格，一般选用康铜材料的胶基箔式应变片，其横向效应小，允许通过较大的电流，散热性好，蠕变小等。一般采用标准120Ω电阻值，也可采用较高的阻值，这样可以在同样工作电流情况下，提高供桥电压，以得到较大的输出电压。贴片时要注意固化、焊接、密封等问题。

在传感器上应变片多以全桥联接，每一桥臂为单片或多片串联，以提高灵敏度，及温度补偿效果。为了保证工作稳定性，有的电桥还设计有一些补偿电阻，如零漂补偿电阻 R_T ，输出灵敏度补偿电阻 R_K ，零点补偿电阻 R_D 等。 R_T 用于补偿由温度引起的零点漂移，用电阻温度系数大的电阻材料作成， R_K 用于补偿由于温度变化，传感器产生的输出灵敏度的变化，即动漂，用电阻温度系数很大的材料制成， R_D 用于调整电桥的初始平衡，用与应变片相同的材料。 R_T 、 R_K 、 R_D 放在靠近应变片处，以使温度条件一致。

对于荷重、拉压力、压力、扭矩等传感器，主要是其弹性元件的形状和测量部位有所



图一 传感器上应变片联接电路

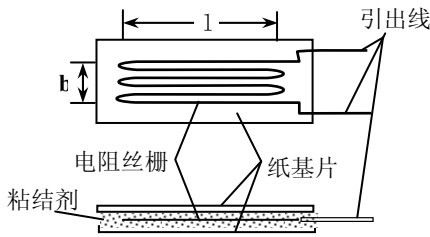
不同，但其原理，结构是大同小异，在此不一一赘述。

（一）电阻应变片

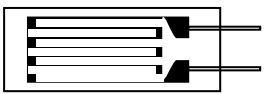
电阻应变测试技术（简称电测法）是实验应力分析中基本的重要的方法之一。1938年首次出现了金属丝粘贴式传感元件，到目前已成为一种使用方便、适用性强、比较完备的测试手段。这里所提到的金属丝粘贴式传感元件，即是现在所谓的电阻应变片（简称应变片），它是一种电阻式的传感器，是电测法的关键元件。

1. 结构：

应变片主要是由粘结在两层纸基之间，绕成栅状的铜镍或镍铬等电阻合金丝及铜引出线组成，或由在树脂材基底上，合金电阻箔片用光刻腐蚀技术制成的栅状及铜引出线组成。如图二和图三所示。图中 b 为丝栅（又称敏感栅）的宽度，称为基宽， l 为丝栅长度，称为基长。



图二 线绕式电阻应变片



图三 箔式电阻应变片

2. 工作原理：

应变片是利用电阻丝的应变效应，即电阻丝的电阻随着其本身的变形（伸长或缩短）而改变，而且在一定的范围内，电阻丝电阻的相对变化 $\Delta R/R$ 与其线应变 ϵ 成线性关系，即 $\Delta R/R=K\epsilon$ ，式中 K 为比例常数，也称为电阻丝的应变灵敏系数。由物理学分析，我们可以得知 K 与电阻丝的尺寸（长度和截面积）以及电阻率随应变而发生的变化有关。但是对于应变片，由于电阻丝变成了栅状，并有粘结剂，基底的影响，因此其灵敏系数就有所不同，其关系仍为 $\Delta R/R=K\epsilon$ ，这 K 称为应变片的应变灵敏系数，它还和基底、粘结剂有关。一般 K 值是在单向应力状态下由实验的方法抽样确定的（ K 值由生产厂家提供）。

应变片是如何传递变形的呢？应变片用粘结剂牢固地粘贴在构件欲测变形处，设构件在外力 P 的作用下，产生力轴方向的变形，有应变 ϵ ，构件的变形带动粘结层以剪应力的形式传到基底，然后基底的变形又以剪应力的形式传到敏感栅上，剪应力的作用使敏感栅承受轴向压力而产生应变，两端为零，向中部移动时按指数曲线形式上升到 ϵ 值。因而我们应注意，应变片的粘贴质量是十分重要的，而且不能随意裁剪基底的大小。

3. 使用：

应变片的阻值有60 Ω 、120 Ω 、350 Ω 、600 Ω 、1K等等，一般常用的多为120 Ω ；应变片及引线与构件之间的绝缘电阻（ R_m ）一般要求50~100M以上；其最大工作电流（ I_{max} ）一般约为25mA，实际上应变仪电桥的电压只有3V左右或更小，因此应变片上的工作电流是很小的。

应变片的粘结剂常用502胶或环氧树脂类，其有较好的粘结强度和韧性，能可靠地传递变形，而且电绝缘性好，使用方便简单。

在不同的使用环境，考虑使用不同基底的应变片，例铜镍合金的应变片电阻温度系数较小，有良好的温度稳定性，因此适合长期的静载实验；镍铬合金的灵敏系数较大，就适合于测量动载下的瞬态变化；而铁铬铝的则二者兼备；还有温度及湿度的不同，也要选用不同基底的应变片。

我们清楚应变片测得的应变值，是其标距（基长）内样品的平均应变，要想尽可能的真实地反映测电的应变，我们在样品应变梯度较大时，要选用小标距的应变片；要反映样品宏观变形时，则要用标距大的应变片；粘贴的方向要与变形的方向一致。

（1）应变片粘贴前要检查应变片是否完好，敏感栅排列是否均匀，用万用表测量阻值是否正确，以防有的断路、短路，造成返工。

（2）为了保证粘贴的强度，试件的表面贴片处要用0#或1#砂纸磨光，打磨面积约为应变片的3~5倍，然后用棉球蘸丙酮对表面进行擦洗2~3遍，清洗后不要用手触摸或接触其它的东西。

（3）在应变片的粘贴面上及试件要贴片处，分别涂上一层薄而均匀的胶层，仔细按需贴片的方位将应变片放好。

(4) 在应变片上盖一张塑料薄膜（或玻璃胶纸），用姆指在其上均匀滚压（注意：只能是垂直压力，不要旋转和错动，不要用力过猛，以免应变片位移或将引出线拉断），把多余的胶水和气泡挤出，用姆指压住，直至应变片粘住为止。轻轻揭去表面的塑料薄膜。

(5) 贴片后，一般即在室温下固化，但为了更快的固化好，可在自然干燥一会后，用红外灯烘烤或用吹风机吹烘，但也不可过热，一般以40~80℃为宜。

(6) 贴片后检查：①观察应变片位置是否正确，粘结层是否有气泡或漏粘部分；②用万用表检查敏感栅的电阻值，是否有短路或断路现象；③检测应变片与试件以及试验机间的绝缘电阻，一般用高阻表测试，绝缘电阻达50~100MΩ即可（一般也可用万用表测量）。

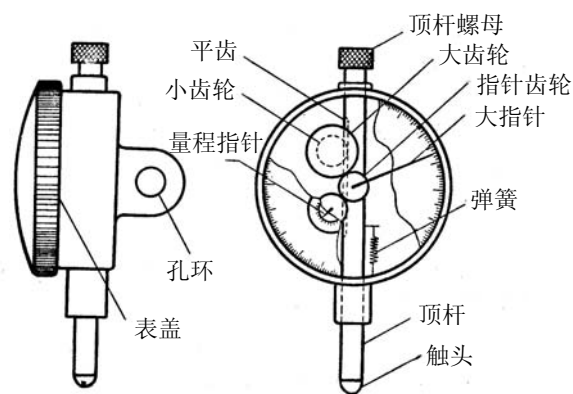
(7) 焊接引线：①为保证引线焊接处绝缘，先在引出线下面的试件上粘贴一块绝缘胶带或橡皮膏；②小心仔细将引出线与导线焊接好，并将导线用胶布固定在试件上，以防导线移动或将引出线拉断；焊接时时间不宜过长，以防引出线过热与敏感栅脱焊；③同样按（6）的过程一样检查应变片的情况。必要时需在应变片上涂上一防护层，以防止测试时受恶劣环境的影响。

(二) 引伸仪简介：

在岩石力学的实验中，位移、形变等参数的测量是十分重要的。测量的手段是多种多样的，有机械方法、光学方法、电学方法等等。因为岩石的变形是很小的，所以对其测量的要求就很高，首先必需要精度高，岩石的变形都在几十、几百微米的量级，如果没有一定的精度就无法测量，因此一般要求精度能达到1%~1%；其次要求要有较大的放大倍数，否则这微小的变形无法辨认和记录。对形变和位移最常用的是各类引伸仪，这里仅将表式引伸仪、应变计式引伸仪和差动变压器式引伸仪作一简单的介绍，使大家对此有一个初步的了解。

(1) 表式引伸仪：

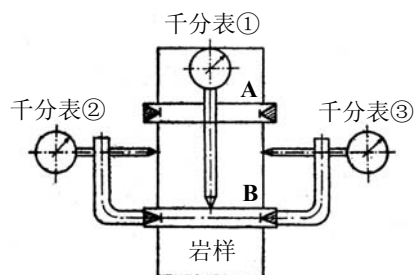
表式引伸仪实际就是由千分表构成的，它是一种对位移和变形的机械测量装置，其结



图一 千分表结构简图

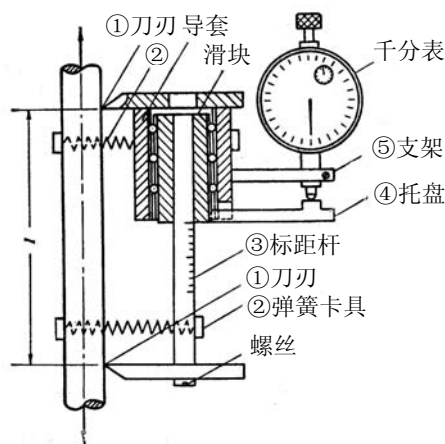
构比较简单，如图一所示。一般使用测量位移时，将千分表固定在表架上，将顶杆的触头顶在被测试件的位移方向一侧，因为有小弹簧的作用，能够使接触的比较紧密，当试件产生位移时，推动了顶杆，使杆上的平齿移动带动了小齿轮及同轴的大齿轮旋转，从而带动指针齿轮和指针旋转，指示出位移的大小，这里一组精密的齿轮组，使位移得到了放大，表盘上的每一小格，即代表位移变化了 $1/1000\text{mm}$ 。

如用千分表进行变形的测量，就要附加一些特殊的固定装置来固定千分表，如图二的示意即是一个例子。这个装置由两组刃口固定在试样上，这样岩石变形时就可以由表①测



图二 千分表测量形变的装置

量出其纵向的变形，表②和③即可测量出其横向的变形。还有一种DM—540型的表式引伸仪（图三），其有两个感受变形的刃口①，由弹簧夹具②将整个装置夹紧在试件上，当试件



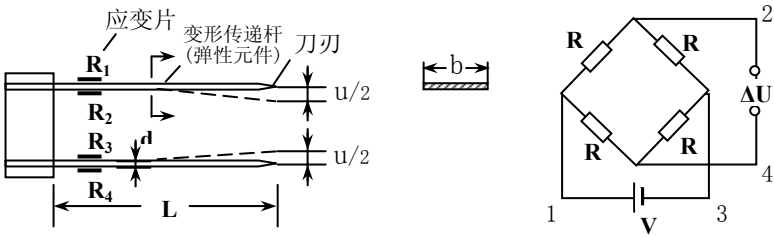
图三 DM—540型表式引伸仪

变形时，两刃口间发生了相对位移，带动了标距杆③移动，和标距杆相连的托盘④也就有了移动，从而使固定在表架⑤上的千分表的顶杆移动，在千分表上读出了位移量，也就是试件的变形。

表式引伸仪其优点是设备简单，结果准确，但是其固定时比较麻烦，同时因固定时要施以一定的力，可能会对岩石的变形产生一些影响，由于固定装置比较大，使用的场合也受到一定的限制。

(2) 应变计式引伸仪：

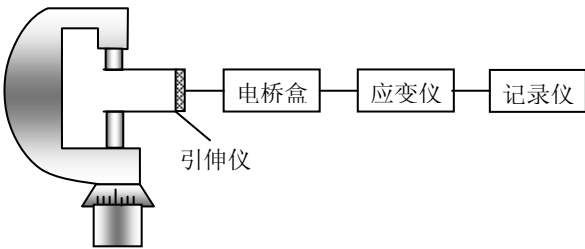
应变计式引伸仪是应用电阻应变片制作的悬臂式的位移计，是一种电测的方法。它主要由两片长 L 宽 b 厚 d 弹簧片组成，我们在弹簧片的根部贴四片应变片组成一电桥，如图四接出四根导线，其中1、3为电桥的供电端，2、4为被测信号的输出端，其变形的信号由此



图四 应变计式引伸仪

通过一应变仪的电桥盒，送至应变仪放大后再送到X—Y记录仪上，作出变形的曲线。这种引伸仪也是由两个刃口由弹簧或链条固定在试件上，感受试件的变形，其测量的相对精度约为1%。

由于这种引伸仪是将位移量转换成电信号输出，所以我们必须给予标定，以确定对应多大的位移，相应输出多大的电压信号。标定时将引伸仪的两臂夹在变形校准器（也可使用螺旋测微器）上，将引伸仪的四根引出线，接到应变仪的电桥盒上（全桥方式），再将应变仪的输出连接到X—Y记录仪的一个记录笔上（或其他记录仪器上），先将应变仪的平衡调好，选择好其衰减挡和X—Y记录仪的量程等，将X—Y记录仪的记录笔置于一选定的



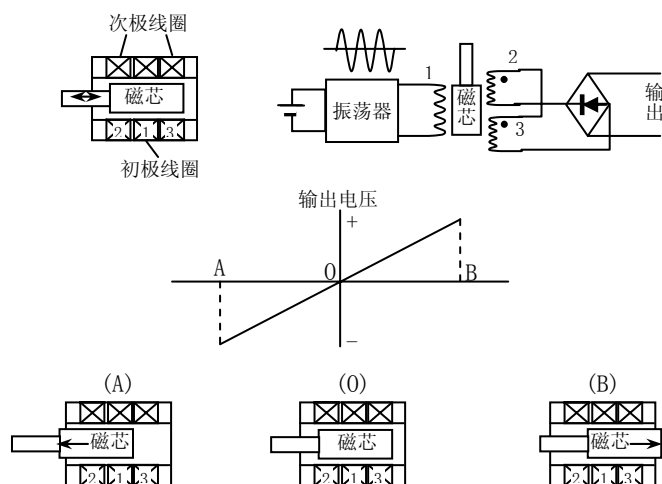
图五 引伸仪的标定

“零点”；开始旋转变形校准器（或螺旋测微器），使引伸仪感受到一标准的位移值，这时X—Y记录仪的记录笔也会产生一相应的位移，这时位移量的大大的放大了，作下记号，再增加一样的标准位移值，X—Y记录仪上又会记下一相应的位移，根据要测量的范围，如

此作几次，即可得到X—Y记录仪上每单位长度所代表的实际位移量，通过应变仪的标定即可得到其应变变量。注意标定之后，实际测量时，整个系统所选取的有关参数不可改变，否则与标定值则不相符。

(3) 差动变压器式引伸仪：

这种引伸仪是利用线性可变差动变压器作为变形的传感器，即是一种电千分表，测量时固定方法与千分表大致相同，千分表是将顶杆的位移经齿轮放大，而这里是将顶杆的位移应用差动变压器的原理，变之为成比例的电压信号，再放大处理。其构造原理如图六所示。其由中间的初级线圈1和两端的次级线圈2、3组成，2与3是反相串联，中心为一可移动



图六 差动变压器式引伸仪结构原理

的磁芯，当磁芯在中间位置时，线圈2、3中的感应电动势 E_{s1} 和 E_{s2} 大小相等、方向相反，这时输出电压为零（ $E_s = E_{s1} - E_{s2}$ ）；当磁芯左移时，线圈2中的感应电动势增加，线圈3中的感应电动势减小，结果电路中有输出，反之磁芯右移时，也有类似的结果，只是输出的电压与磁芯左移时相反，在一定的范围内，输出的电压信号与磁芯的位移成正比。其特点是测量范围大，精度高，并可用于动态测量。差动变压器式引伸仪在使用之前也要进行标定，标定的原理方法与应变计式引伸仪大致相同。目前实际使用的差动变压器式引伸仪已将电子线路装在差动变压器内，只要输入一直流电压即输出一与位移成正比的直流电压。

实验误差分析及数据处理

一、误差分析：

1. 误差分类：

我们在进行力、应力、应变、位移等物理量的测量实验时，不可避免地会存在着各方面的误差，就其性质来讲，大体可分为系统误差和偶然误差（随机误差）两大类，还有一种过失误差是由于人为造成的，我们不予讨论。

系统误差是一规则的恒定的误差，是由确定的系统产生的固定不变的因素引起的误差。该误差的偏向及大小总是相同的，如用偏重的砝码称重，所称得的物体的重量总是偏轻；应变片灵敏系数偏大，那么所测得的应变值则总是偏小。

偶然误差是一种不规则的随机的误差，无法预测它的大小，其误差没有固定的大小和偏向。

系统误差有固定的偏向及规律性，可采取适当的措施予以校正、消除。而偶然误差，只有当测量的次数足够多时，其服从统计规律，其大小等可由概率决定。

2. 基本概念：

- **真值：**客观存在的某一物理量的真实值，由于条件的限制，可以说真值是无法测得的，我们只能得到真值的近似值。
- **测量（实验）值：**用实验方法测量得到的某一物理量的数值。
- **理论值：**用理论公式计算得到的某个物理量的值。
- **误差：**测量值与真值的差， $\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$ 。
- **准确度：**反映实验的测量值与真值的接近程度，其由系统误差决定。
- **精密度：**多次测量数据的重复程度，其由偶然误差决定，但精密度高不一定准确度高，我们要求既要有高的准确度又要有高的精密度，即是要有高的精确度，也就是通常所说的测量精度。

3. 有效数字：

测量时的读数一般读到仪器刻度的最小刻度中的分数，不能略去，但末位数是欠准确的。最后一位数字为 0 时，也不可略去，因为其是有效数字，否则降低了数值的准确度。

运算时，各数所保留的小数位数应以有效数字位数最少的为准；乘除法时所得的积或商得准确度不应高于准确度最低的因子。当大于或等于四个的数据计算平均值时，有效位数增加一位。

4. 系统误差的修正:

对于系统误差常常用对称法和校准法尽可能的消除或减小它。

对称法: 利用对称性在实验系统的对称位置同时进行测量, 数据平均以消除系统误差。

校准法: 使用更准确的仪器校准实验仪器, 以减小系统误差; 分析利用修正公式修正实验测量数据, 以消除系统误差。

5. 偶然误差:

① 算术平均和标准误差:

前面提到测量值=真值+误差, 这里误差包含了系统误差和偶然误差, 则测量值=真值+系统误差+偶然误差, 当系统误差修正后, 误差主要即是偶然误差。在多次测量中, 偶然误差是一随机的变量, 那么测量值也就是一随机变量, 我们则可用算术平均值和标准误差来描述它。

算术平均值 \bar{X} :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中 x_i 为第 i 次测量的测量值, n 为测量次数, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{X} \rightarrow x_t$ (真值), 但是当 n 增加到一定程度时, \bar{X} 的精度的提高就不显著了, 所以一般测量中 n 只要大于10就可以了。

用最小二乘法原理可确定一组测量值中的最佳值, 它能使各测量值误差的平方和为最小, 而最佳值正好是算术平均值。

标准误差 S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

我们用 $\delta_i = X_i - \bar{X}$ 表示第 i 次测量与算术平均值间的偏差, 则有

$$S = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n-1}}$$

当 $n \rightarrow \infty$, $\bar{X} \rightarrow x_t$ 时, 则标准误差为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$$

标准误差是各测量值误差平方和的平均值的平方根，又叫均方根误差，它对较大或较小的误差反应比较灵敏，是表示测量精密度较好的一种方法。

② 多次测量的误差分布：

误差服从于统计规律，其概率分布为正态分布的形式，即正负误差的概率相等，分布曲线对称于纵轴。

我们以算术平均值代表真值， x 表示测量误差， $y(P(x))$ 表示测量误差 x 出现的概率密度， S 为标准误差，这时则有误差的函数形式

$$y = P(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2S^2}}$$

该公式是高斯于1795年找出的故称为高斯误差分布定律。式中 $\frac{1}{\sqrt{2}S} = h$ 又称为精密度指数，上式则为：

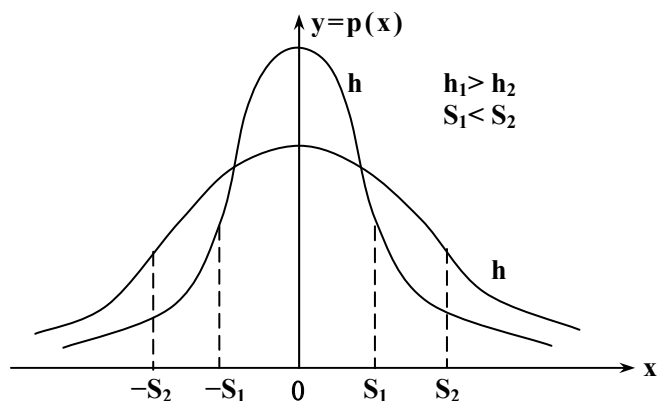
$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}$$

根据上式可作出误差概率密度图即高斯误差分布曲线，如图一。

根据曲线可见 $|x|$ 越大， y 值越小， $|x|$ 越小 y 值越大，当 $x=0$ 时，

$$y_0 = \frac{h}{\sqrt{\pi}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S}$$

y_0 是误差分布曲线的最高点，它与 S 成反比，与 h 成正比。因此 h 越大 S 越小时曲线中部越高，两边下降越快；反之曲线变得越平。 h 反映测量的精密度大小， S 决定误差曲线幅度大小，并表示曲线的转折点。



图一 高斯误差分布曲线

从误差分布曲线，我们可看出偶然误差的特性：(1) 小误差比大误差出现的概率高，很大的正、负误差出现的概率都很小。(2) 大小相等，符号相反的误差出现的概率相等。(3) 标准误差 S 愈小时，曲线中部愈高，两边下降的愈快，说明测量值集中，测量的精度高；反之，曲线变得愈平，说明测量值分散，精度低。

经计算表明，一般误差在 $-S$ 和 $+S$ 之间的概率为68%，在 $-2S$ 与 $+2S$ 之间的概率为95%，在 $-3S$ 和 $+3S$ 之间的概率为99.7%，这已可认为代表了多次测量的全体，所以我们将 $3S$ 叫作极限误差。若将某多次测量的物理量记为 $\bar{x} \pm 3S$ ，就可认为，对该物理量的任一次测量，都不会超出该范围。如某一批应变片的灵敏系数的算术平均值 $\bar{K}=2.465$ ，经计算得出其标准误差 $S=0.007$ ，则这一批应变片的灵敏系数实际取值范围可写为 $K=\bar{K} \pm 3S=2.465 \pm 0.021$ ，这里 $0.021/2.465=0.887\%$ ，其又可写为 $K=2.465 \pm 0.887\%$ 。

③ 或然误差：

规定概率为50%时的误差叫或然误差：

$$\gamma = 0.6745S$$

在有限测量次数时，或然误差计算公式为：

$$\gamma = 0.6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

实验结果的精度可用绝对误差表示，也可用相对误差表示，并常用相对百分误差表示。

③ 可疑数据的舍弃：

在实验的多次测量中，我们常也会遇到个别测量值与多数值相差较大的情况，这个别数据即是可疑数据，不加分析的舍取，都是错误的，必须经过认真的分析，来决定这些数据的舍取。有的是测量元件的质量问题或测试安装问题造成的异常，可以舍去，有的则应根据统计学的偶然误差理论来取舍处理这些可疑数据。

(1) 肖维纳(W. Chauvenet)方法：

该方法是肖维纳早在1876年就提出了，它设在 n 个测量值中任意一数据与平均值有一误差(d)，当等于或大于此偏差的所有偏差出现的概率均小于 $1/2n$ 时，该数据则应予舍弃。他列出一数据舍弃标准表(表1—1)，表中 n 是测量的次数， c 是合理的误差限与根据测量数据算得的标准误差 S 的比值，如果某一数据的测量偏差 d 与标准误差 S 的比值大于表中对应的 c 值时，则这一数据应予以舍弃。

先求出各测量数据的算术平均值和单次测量的标准误差，计算时可疑数据应包括在内；再计算出可疑的较大偏差与标准误差之比；根据表中 n 与 c 来决定数据的取舍。

表1—1

n	c	n	c	n	c	n	c	n	c	n	c
5	1.65	10	1.96	15	2.13	20	2.24	40	2.50	100	2.81
6	1.73	11	2.00	16	2.16	22	2.28	50	2.58	200	3.02
7	1.79	12	2.03	17	2.18	24	2.31	60	2.64	500	3.29
8	1.86	13	2.07	18	2.20	26	2.35	80	2.74		
9	1.92	14	2.10	19	2.22	30	2.39				

例：

有某实验10次测量数据如下：

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
m_i	45.3	47.2	46.3	48.9	46.9	45.8	46.7	47.1	45.7	45.1	$\sum m_i = 464.9$
d_i	-1.2	0.7	-0.2	2.4	0.4	-0.7	0.2	0.6	-0.8	-1.4	$\sum d_i = 0$
d_i^2	1.44	0.40	0.04	5.76	0.16	0.49	0.04	0.36	0.64	1.96	$\sum d_i^2 = 11.29$

先算出算术平均值，有

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i}{n} = 46.5$$

可算出每次测量偏差 d_i ，再求出这10次测量的标准误差，得

$$s = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{11.29}{9}} = 1.12$$

由表1—1查得测量次数 $n=10$ 时， $c = x_i/s = 1.96$ ，也即合理误差限 $x_i = 1.96s$ ，这就说明误差在 $\pm 1.96s$ 以外的值都要舍去，这里

$$1.96s = 1.96 \times 1.12 = 2.19$$

我们以算术平均值代表真值，表中第4个测量值的偏差 d_i 为2.4，在 ± 2.19 以外，应当舍去，再计算其余9个数据的算术平均值和标准误差，有

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i}{n} = \frac{416.0}{9} = 46.2$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{5.53}{8}} = 0.831$$

这时剩下9个数据测量次数 n 也变为9, 由表1—1查得测量次数 $n=9$ 时, $c = x_i/s = 1.92$, 也即合理误差限 $x_i = 1.92s = 1.92 \times 0.831 = 1.596$, 这时偏差最大的数是第10个数, 它的偏差为45.1-46.2(这里不是46.5了)=-1.1, 其落在 ± 1.596 之内, 因而这9个数据都应保留。这时所测数据应取值 $m = \bar{m} = 46.2$ 。

(2) 格拉布斯(F. E. Grubbs)方法:

设某测值 X 是正态分布, 其算术平均值为 \bar{X} , 标准误差为 S , 其从小到大排列为 $X_1, X_2 \dots X_{n-1}, X_n$, 该数列中最大值 X_n 和最小值 X_1 为可疑值, 则有

$$X_1 \text{ 是可疑值有 } T = \frac{\bar{X} - X_1}{S} \quad X_n \text{ 是可疑值有 } T = \frac{X_n - \bar{X}}{S}$$

其中 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$, 选定危险率 α , α 是一个较小的百分数, 如

5.0%, 2.5%, 1.0%。 α 是按格拉布斯方法判定为异常数据而实际上不是异常数据而犯错误的概率, 这种错误是统计方法不可避免的。然后我们到格拉布斯的表中找到相应的 n (测量次数)和 α (危险率)所对应的 $T(n, \alpha)$ 值, 如果我们计算的 $T \geq T(n, \alpha)$, 则该数据应予以舍弃(这时表明该判断犯错误的概率为 α), 反之数据不予舍弃。 α 值不宜选的过小, 因为 α 小了, 把不是异常数据判断为异常数据的错判概率减小了, 但把确是异常数据判断为不是异常数据而犯错误的概率增大了。

但是格拉布斯方法比肖维纳方法不易舍去可疑数据, 因而多采用肖维纳方法。

④ 间接测量误差分析:

在实际工作中有些物理量我们无法对其进行直接的测量, 必须通过对一些与其有关的可以直接测量的物理量 x 、 y 、 z 的测量, 再按一定的公式计算求得。这里就有一误差的传递, 即直接测量量的误差对间接测量量的影响。

间接测量中常有两种问题, 一种是已知直接测量值的误差, 求间接测量值的误差, 即已知自变量的误差求函数的误差。另一种是给定间接测量值的误差, 求各直接测量允许的最大误差, 即已知函数的误差求自变量的误差。

设一间接测量物理量 u , 它与 x 、 y 、 z 的关系为 $u=f(x, y, z)$, 若 x 、 y 、 z 的测量误差分别为 Δx 、 Δy 、 Δz , 它们引起的 u 的误差为 Δu , 则有

$$u + \Delta u = f(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$$

由泰勒公式, 并略去误差的高次项, 得

$$u + \Delta u = f(x, y, z) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z$$

或

$$\Delta u = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z$$

该式即为误差传递公式。

例如我们通过直接测量圆柱形试件的直径**D**及高**H**来计算试件的体积**V**。

首先设**D**及**H**的测量误差分别为 ΔD 和 ΔH ，圆柱体的体积公式是 $V = \frac{1}{4} \pi D^2 H$ ，由传递

公式，我们则可得到体积**V**的误差

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{\partial V}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial V}{\partial H} \Delta H = \frac{\pi D H}{2} \Delta D + \frac{\pi D^2}{4} \Delta H \\ &= 2V \frac{\Delta D}{D} + V \frac{\Delta H}{H} \end{aligned}$$

两边同除以**V** 则有相对误差

$$\frac{\Delta V}{V} = 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta H}{H}$$

由该式可见对体积误差的影响，直径的测量引起的相对误差远高于高度测量引起的相对误差。

前面的误差传递公式是一般公式，对于系统误差及偶然误差都是适用的，那么对于标准误差传递公式的形式如何呢？同样我们设有关系 $y = f(X_1, X_2, \dots, X_r)$ ，其自变量 X_1, X_2, \dots, X_r 为 r 个直接测量的物理量，其标准误差分别为 S_1, S_2, \dots, S_r ，对 X_1, X_2, \dots, X_r 各作了 n 次测量，可得出 n 个 y 的值：

$$y_i = f(X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ri}) \quad i=1, 2, \dots, n$$

每次测量的误差，根据传递公式有

$$\Delta y_i = \frac{\partial y}{\partial X_1} \Delta X_{1i} + \frac{\partial y}{\partial X_2} \Delta X_{2i} + \dots + \frac{\partial y}{\partial X_r} \Delta X_{ri}$$

上式两边平方，得

$$\Delta y_i^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial X_1}\right)^2 \Delta X_{1i}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial X_2}\right)^2 \Delta X_{2i}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial X_r}\right)^2 \Delta X_{ri}^2 + 2\left(\frac{\partial y}{\partial X_1}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial X_2}\right)\Delta X_{1i}\Delta X_{2i} + \cdots$$

当i由1到n求和，n 到足够大时，正负误差出现的概率相等（偶然误差的正态分布规律），交乘项相互抵消，则剩下所有的平方项

$$\sum \Delta y_i^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial X_1}\right)^2 \sum \Delta X_{1i}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial X_2}\right)^2 \sum \Delta X_{2i}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial X_r}\right)^2 \sum \Delta X_{ri}^2$$

两边同除以n，再开平方则得标准误差

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial X_1}\right)^2 S_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial X_2}\right)^2 S_2^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial X_r}\right)^2 S_r^2}$$

相对标准误差为

$$e = \frac{S}{n} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \frac{\partial y}{\partial X_1}\right)^2 S_1^2 + \left(\frac{1}{n} \frac{\partial y}{\partial X_2}\right)^2 S_2^2 + \cdots + \left(\frac{1}{n} \frac{\partial y}{\partial X_r}\right)^2 S_r^2}$$

若 $n = X_1, X_2, \cdots, X_r$

$$\text{则 } \frac{\partial y}{\partial X_1} = X_2 X_3 \cdots X_r, \quad \frac{\partial y}{\partial X_2} = X_1 X_3 \cdots X_r, \quad \frac{\partial y}{\partial X_r} = X_1 X_2 \cdots X_{r-1}$$

$$\therefore e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \cdots + e_r^2}$$

（式中 $e_1^2, e_2^2, \cdots, e_r^2$ 分别是 X_1, X_2, \cdots, X_r 的相对标准误差）

例：我们测量某一模型表面某点的主应变值 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 及材料的弹性模量 E 、波松比 μ 的算术平均值为

$$\varepsilon_1 = 593 \times 10^{-6}, \varepsilon_2 = 166 \times 10^{-6}, \bar{E} = 3.64 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2, \mu = 0.359$$

对应的标准误差为

$$S_{\varepsilon_1} = 4.24 \times 10^{-6}, S_{\varepsilon_2} = 3.30 \times 10^{-6}, S_E = 0.0832 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2, S_\mu = 0.0116$$

试求当利用虎克定律

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1) \end{aligned} \right\}$$

计算测点主应力 σ_1, σ_2 时, 标准误差 $S_{\sigma_1}, S_{\sigma_2}$ 是多少。

由公式可得主应力 σ_1 得标准误差应为

$$S_{\sigma_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1}\right)^2 S_{\varepsilon_1}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_2}\right)^2 S_{\varepsilon_2}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial E}\right)^2 S_E^2 + \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \mu}\right)^2 S_{\mu}^2}$$

计算式中各项得

$$S_{\sigma_1} = \sqrt{(315 + 24.5 + 3950 + 1180) \times 10^{-4}} = 0.739 \text{ kg/cm}^2$$

同理, 可求得主应力 σ_2 的标准误差

同样, 当我们确定了某一间接量的误差范围时, 可对与其有关的各直接测量量求出所允许的误差范围, 当然这样的问题有多种的分配方案, 当各直接测量量的误差难以估计时, 可用等效传递原理即假定各自变量 (直接量) 的误差对函数 (间接量) 误差的影响相等来解决。

对于函数 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_r)$

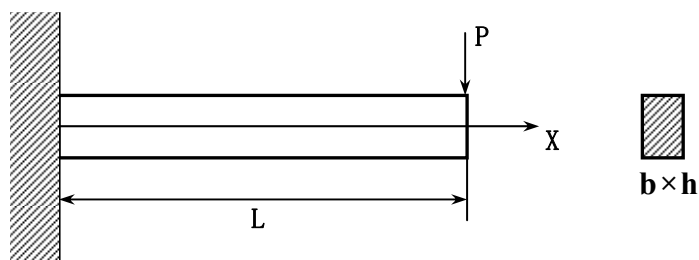
$$\begin{aligned} S_y &= \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 S_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 S_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_r}\right)^2 S_r^2} \\ &= \sqrt{r \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 S_i^2} = \sqrt{r} \frac{\partial y}{\partial x_i} S_i \end{aligned}$$

有

由此可知各自变量的误差为

$$S_1 = \frac{S_y}{\sqrt{r} \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)}, \quad S_2 = \frac{S_y}{\sqrt{r} \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)}, \quad \dots, \quad S_r = \frac{S_y}{\sqrt{r} \left(\frac{\partial y}{\partial x_r} \right)}$$

例如图二所示一悬臂梁的应力测量，要求误差 $\leq 2\%$ ，那么各测量量允许有多大的误差呢？



图二 悬臂梁的应力测量

根据梁的正应力公式有

$$\sigma_x = \frac{M}{W} = \frac{6Pl}{bh^2} = f(P, l, b, h) = y$$

根据刚才介绍的公式，在本例中即 $r=4$ ，同时有

$$\frac{\partial y}{\partial P} = \frac{6l}{bh^2} = \frac{\sigma_x}{P}, \quad \frac{\partial y}{\partial l} = \frac{\sigma_x}{l}, \quad \frac{\partial y}{\partial b} = -\frac{\sigma_x}{b}, \quad \frac{\partial y}{\partial h} = -\frac{2\sigma_x}{h}$$

根据要求 $S_\sigma = \pm 0.02\sigma_x$ ，即 $\frac{S_\sigma}{\sigma_x} = \pm 2\%$ ，则

$$S_P = \frac{S_\sigma}{\sqrt{r} \frac{\partial y}{\partial P}} = \frac{\pm 0.02\sigma_x}{2 \frac{\sigma_x}{P}} = \pm 0.01P$$

$$S_l = \pm 0.01l, \quad S_b = \pm 0.016b, \quad S_h = \pm 0.005h$$

⑤ 单次测量的误差分析:

有些数据的测量,我们难以在完全同样的情况下进行多次测量。如对一些试件加载测量应变即是如此。这样我们无法计算一算术平均值,而要估计这一次测量中包含了多大的偶然性误差。

我们在前面谈到极限误差为 $3S$,它基本上就是任意某一次测量的最大绝对误差,因此我们可以把 $3S$ 作为单次测量误差估计的标准。但是 S 值在单次测量的结果无法得到。我们由间接测量的标准误差公式得

$$S = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)S_x\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial}{\partial y}\right)S_y\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial}{\partial z}\right)S_z\right]^2}$$

两边同乘以 3 , 设

$$d = 3S, \quad d_1 = 3\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)S_x, \quad d_2 = 3\left(\frac{\partial}{\partial y}\right)S_y, \quad d_3 = 3\left(\frac{\partial}{\partial z}\right)S_z, \quad \text{则有}$$

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}$$

该式即表示为某物理量测量结果的最大绝对误差为 d , 而 d_1, d_2, d_3 分别是 x, y, z 这些环节给测量结果带来的最大绝对误差, 式两端同除以该物理量的测量值

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}$$

该式的含义则为某一物理量测量结果的最大相对误差等于各环节给这测量结果带来的最大相对误差平方和的开方。这里 $\delta_1, \delta_2, \dots$ 必需是偶然误差且是各环节给测量结果带来的误差, 而不是各环节本身的误差。

例如应变片测量应变时, 整个系统各环节的误差可能有贴片引起的误差(δ_1), 应变片本身的误差(δ_2), 应变仪的误差(δ_3), 记录仪的误差(δ_4), 标定误差(δ_5)等, 那么该单次测量结果的最大相对误差 δ 为

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2} \times 100\%$$

贴片主要是方向的偏斜，规定最大偏斜 5° ，引起的相对误差为1%，即 $\delta_1=1\%$ ；应变片误差主要是灵敏系数K，一般 $K=2.02\pm 1\%$ ，则 $\delta_2=\pm 1\%$ ，应变仪误差它包括振幅特性误差 δ_{31} 和稳定性误差 δ_{32} ，按仪器说明书知 $\delta_{31}=\pm 1\%$ ，因测量持续时间不长，故 δ_{32} 主要考虑灵敏度的变化，按说明书 $\delta_{32}=\pm 1\%$ ，其组合为

$$\delta_3 = \pm \sqrt{\delta_{31}^2 + \delta_{32}^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{100}\right)^2 + \left(\frac{1}{100}\right)^2} = \pm 1.41\%$$

记录仪的误差一般与记录波峰的高度有关，对于50mm的波峰，误差0.5mm，则有记录仪误差 $\delta_4=\pm 0.5/50 \times 100\%=\pm 1\%$ ，标定误差按应变仪说明书应变仪的标定误差为 $\delta_{51}=\pm 1\%$ ，因给出信号由记录仪记录，则有记录曲线取值带来的误差 $\delta_{52}=\pm 1\%$ ，其组合为

$$\delta_5 = \pm \sqrt{\delta_{51}^2 + \delta_{52}^2} = \pm 1.41\%$$

最后都代入 δ 式则有

$$\delta = \pm \sqrt{I^2 + I^2 + 1.41I^2 + I^2 + 1.41I^2} \times 100\% = \pm 2.64\%$$

即所侧得的应变的最大相对误差是 $\pm 2.64\%$ 。

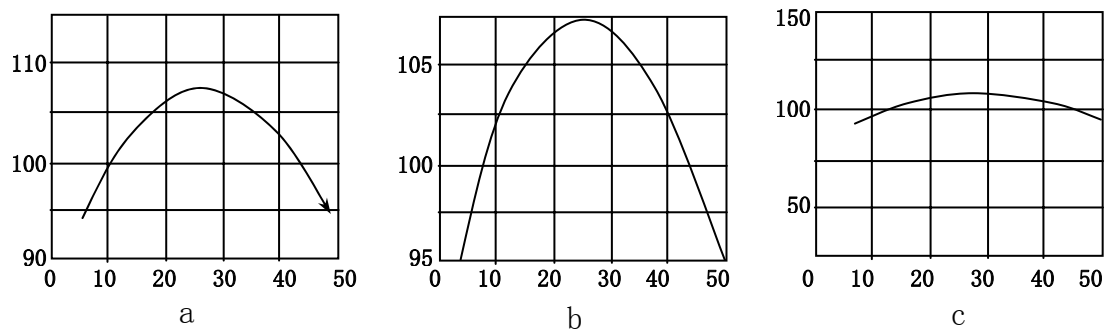
二、实验数据的表示方法：

我们实验的数据经整理后必须以一定的方法表达，一般常用的有三种方法，即图示法，列表法和方程法，其各有优缺点，根据需要我们采用不同的方法。

1. 图示法：

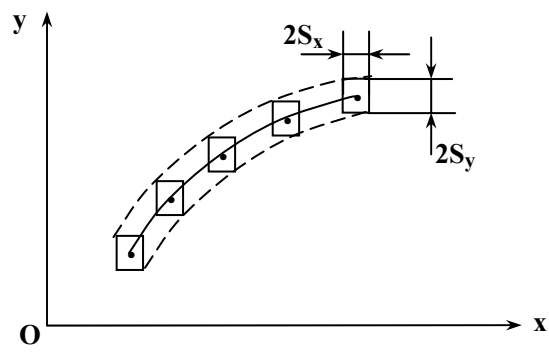
图示法又称为曲线表示法，该方法在我们实验数据整理中最常用，最重要。其特点是简明直观，可一目了然地了解实验结果的全貌，便于比较，了解最大最小值，转折点及周期等特点，还可直接对变量积分、微分，而不必知道变量间的数学关系。

① 作数据曲线首先要选定采用合适的坐标形式，如直角坐标、三角坐标、对数坐标等。一般X轴代表自变量，Y轴代表因变量。为使曲线上每一点都能方便地找到其坐标，坐标的分度也应选的合适。坐标的最小分度应与数据的误差相适应，过细则超出实验精度，使曲线人为弯曲，有虚假精度和无效数字，过粗则降低了实验精度，使曲线过于平直。如图三所示：



图三 坐标分度不同的比较

- ② 曲线中最简单，使用最方便的是直线，可对变量加以变换，使图形尽可能为直线，如采用半对数关系 ($\log X, Y$)，对数关系 ($\log X, \log Y$)，幂指数关系 (X^n, Y) 等等。
- ③ 对于要求不高，只要求变化趋势的情况下，可直接将数据点在坐标内，但要作准确的曲线时，则要按一定的规则描点。实验数据都有一定的误差，因此画图时不能简单的描点，而应以一矩形表示，如图四，矩形的两边分别代表自变量和因变量的



图四 描点示意

- 误差，中心代表算术平均值，真值在此矩形内。用两倍标准误差作为误差的合理范围，所得曲线介于两虚线间的概率为95%。
- ④ 必须有足够多的数据点，才可能作出一连续光滑的曲线，同时还应注意曲线应尽量地与所有的数据点相接近，但不必通过各点，尤其是曲线的两端；曲线应尽量光滑，少有折点；曲线两侧的点数应大体相等；曲线一般不可有不连续点或奇异点。

2. 列表法：

列表法即是将数据中自变量，因变量的各个数据值按一定的形式和顺序一一对应排列成表格的方法。其形式简单易作，数据易于比较，还可同时表示多个变量间的关系。

列出表格要简单明了，表要求表名、序号、名称、项目、说明及数据来源等项，各项目要写明名称及单位，数据表示要统一等等。

3. 方程表示法：

一般在做出曲线后，都还希望能有一方程式或经验公式把曲线表示出来，以便作有关的运算。

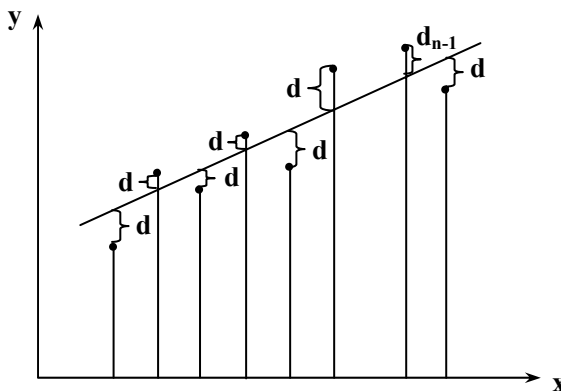
作出曲线后，可根据曲线大致推测出方程的形式，是直线式、幂函数式、指数函数式等，根据实验数据以一定的条件，决定方程中的待定常数。

我们总希望得出的方程既简单又能较准确地反映实验结果，现在还没有简单的方法，通常是根据曲线的形式及经验，用解析几何的原理，假设一简单的方程，待方程中的常数确定后，用实验数据进行检验，若不合适，将方程修改，再进行验证，直至满意为止。当然最简单的经验公式为直线式，所以，尽可能的使函数的形式取为直线式。

如何确定方程中的任意常数呢？最常用的方法有直线图解法和最小二乘法等。

直线图解法比较简单，只要在坐标中画一直线使其尽可能接近每一数据点即可，该直线的斜率即是直线式 $y=mx+b$ 中的 m 值，直线在 y 轴上的截距即 b 值，斜率可由 Δy 与 Δx 的比值计算，这样就写出了该直线式方程。该方程一般的精度约为 0.5%。

最小二乘法是一般求常数最常用的方法，假设自变量无误差，而因变量有测量误差，这时拟合最好曲线是各数据点与曲线的偏差的平方和最小，即 $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 等于最小。



图五 最小二乘法

该实验曲线为直线，方程为 $y=ax+b$ ，其中 a 、 b 为任意常数，设有 n 组 x 、 y 值适合于该方程，以 y'_i 代表 b 和 a 已知时根据 x_i 值计算的 y 值，即 $y'_i=ax_i+b$ ， $i=1,2,\dots,n$ 。这时测量值 y_i 与直线的偏差为

$$d_i = y_i - y'_i = y_i - b - ax_i$$

则有

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = (y_1 - ax_1 - b)^2 + (y_2 - ax_2 - b)^2 + \cdots + (y_n - ax_n - b)^2$$

要使该式最小的必要条件是分别对 a 、 b 的偏导数皆为零，即

$$\frac{\partial}{\partial a}(\sum d_i^2) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial b}(\sum d_i^2) = 0$$

可得

$$\begin{cases} \sum x_i y_i - a \sum x_i^2 - b \sum x_i = 0 \\ \sum y_i - a \sum x_i - nb = 0 \end{cases}$$

两式联立解得 a 和 b 为

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ b = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \end{cases}$$

将此结果代入方程 $y=ax+b$ 中，即得我们所要求的实验结果的直线方程。从几何意义上讲， a 、 b 分别代表了直线方程的斜率和截距。

在什么情况下可以把两个变量间的关系确定为直线关系呢，我们用一个数量的指标来描述两个变量线性关系的密切程度，这个指标称为相关系数，用 r 表示，可由下面的公式计算

$$r = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx}L_{yy}}}$$

式中

$$L_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}$$

$$L_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$$

$$L_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n}$$

当x、y实验数据的相关系数r的绝对值越接近1，则x、y间的线性关系越好，如果 $|r|=1$ 则所有实验数据都在一条直线上，称x与y完全线性相关，如果r=0，则说明x与y毫无线性关系（或没有关系，或非线性关系）。对于一个具体的问题，只有相关系数r的绝对值大到某一起码值 r_q 时，才可用直线来近似地表示x与y间的关系，一般 r_q 与实验数据的个数n有关，见表二。

表二 相关系数检验表

n-2	r _q	n-2	r _q	n-2	r _q	n-2	r _q
1	0.997	11	0.553	21	0.413	35	0.325
2	0.950	12	0.532	22	0.404	40	0.304
3	0.878	13	0.514	23	0.396	45	0.288
4	0.811	14	0.497	24	0.388	50	0.273
5	0.754	15	0.482	25	0.381	60	0.250
6	0.707	16	0.468	26	0.374	70	0.232
7	0.666	17	0.456	27	0.367	80	0.217
8	0.632	18	0.444	28	0.361	90	0.205
9	0.602	19	0.433	29	0.355	100	0.195
10	0.576	20	0.423	30	0.349	200	0.138

应变测量中的误差分析

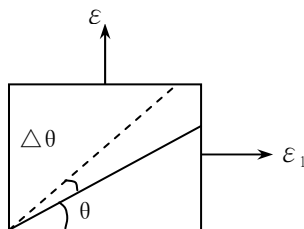
在我们的实验中，由于实验环境、条件、人的操作、视觉误差及实验工艺等方面的因素，实验结果所得到的数据和实际真实的值之间存在着一定的差异，这就是实验误差。我们要采取一切手段尽量减小这些误差，使实验数据接近于真值。

在应变测量中，主要的误差来源于以下几个方面。

1. 由应变片粘贴工艺引起的误差：

应变片轴线偏离了原定的方向。若原定的方向为 θ ，如图一所示，其主应变为

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cos 2\theta$$



图一 应变片贴片方向误差示意

当贴片偏离了 $\Delta \theta$ 时，其应变则为

$$\varepsilon_{\theta+\Delta\theta} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cos 2(\theta + \Delta\theta)$$

这二者的差即为

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{\Delta\theta} &= \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)[\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \Delta\theta)] \\ &= (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\sin(2\theta + \Delta\theta)\sin \Delta\theta\end{aligned}$$

对于单向压缩，沿最大主应力方向的应变片， $\theta=0^\circ$ ，这时 $\varepsilon_2=\mu \varepsilon_1$ ，则有

$$\Delta\varepsilon_{\Delta\theta} = (1 - \mu)\varepsilon_1 \sin^2 \Delta\theta \approx (1 - \mu)\varepsilon_1 \Delta\theta^2$$

这时的误差即为

$$\delta = \frac{\Delta \varepsilon_{\Delta \theta}}{\varepsilon_{\theta}} = (1 - \mu) \Delta \theta^2 \times 100\%$$

同时在粘贴时，若粘贴的胶粘贴不牢或胶层过厚，就无法实际如实地传递试件的形变信息，造成较大的误差。

2. 应变片及测试条件引起的误差：

应变片的横向效应，机械滞后及蠕变都会带来测量误差，一般机械滞后及蠕变引起的误差均在1%以内，所以可不予以考虑。

温度变化引起的误差，由于环境温度的变化引起应变片电阻的相对变化，这为温度效应，这种效应产生了虚假的应变。如环境温度变化 Δt °C时，应变片电阻丝的温度系数为 α_s （即一欧的电阻当温度变化1°C时的变化量），产生的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R_t}{R} = \alpha_s \Delta t$$

同时应变片敏感栅材料和被测试件材料的膨胀系数不同，应变片被拉长（或缩短），产生了一定的附加应变 ε_F ，为

$$\varepsilon_F = \beta_B \Delta t - \beta_S \Delta t$$

这里 β_B 为被测材料的线膨胀系数（m/m/°C）； β_S 为敏感栅材料的线膨胀系数（m/m/°C）。相应的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R_2}{R} = K(\beta_B - \beta_S) \Delta t$$

因此温度变化引起的总的电阻相对变化为

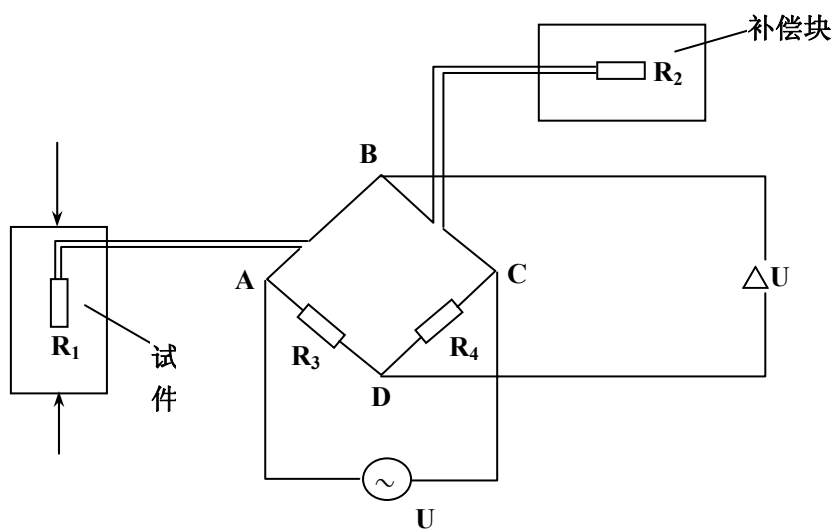
$$\frac{\Delta R_t}{R} = \alpha_s \Delta t + K(\beta_B - \beta_S) \Delta t$$

对应的应变则为

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_t}{R} / K = \frac{1}{K} \alpha_s \Delta t + (\beta_B - \beta_S) \Delta t$$

我们可看出这个虚假应变是相当大的，因此测量时要采取温度补偿的办法，一般常温下用桥路补偿法，其主要是通过贴片和接桥的方法来消除温度的影响。

测量时我们可另选一块与被测试件完全相同的材料样品，作为温度补偿块，在该补偿块上粘贴上与试件上所贴的完全相同的应变片（称为温度补偿片），并使补偿块也除掉处于与试件完全相同的温度条件下，但不受力（当然也可贴在试件上的某一不受力的部位也可）。然后将该补偿片接在与试件工作片相邻的桥臂上（如图二），这样即可达到温度补偿的目的。



图二 补偿片补偿法

当试件受力且温度变化时，工作片电阻值由原来的 R_1 变为 $R_1 + \Delta R_{1p} + \Delta R_{1t}$ （ ΔR_{1p} —受力引起的电阻变化， ΔR_{1t} —温度改变引起的电阻变化）。同样补偿片的电阻也由原来的 R_2 变为 $R_2 + \Delta R_{2t}$ ，因为我们选用时 $R_1 = R_2$ ，且 $R_{1t} = R_{2t}$ ，根据多工作桥臂电桥输出关系

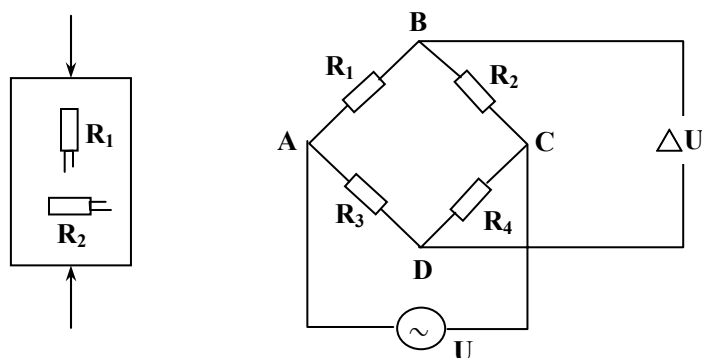
$$\Delta u_0 = \frac{u}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

作为半桥测量时， R_3 、 R_4 为仪器中的固定电阻，因此 $\Delta R_3 / R_3$ 和 $\Delta R_4 / R_4$ 为零，这时则有

$$\begin{aligned}\Delta u_0 &= \frac{I}{4} \left(\frac{\Delta R_I}{R_I} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) u = \frac{I}{4} \left(\frac{\Delta R_{Ip} + \Delta R_{It}}{R_I} - \frac{\Delta R_{2t}}{R_2} \right) u \\ &= \frac{I}{4} \left(\frac{\Delta R_{Ip}}{R_I} \right) u = \frac{I}{4} K_\epsilon u\end{aligned}$$

由此可知，温度变化引起的电阻变化已经消除，实现了温度补偿，仪器上的应变读数 ϵ 仅是受力时引起的变化。该方法称为补偿片补偿法。

还有一种称为工作片补偿法，该方法的补偿片与工作片一样贴在试件上受力部位。我们在被测的试件上找一应变符号相反（如拉伸与压缩），比例关系已知，温度条件相同的两点，各贴上一应变片，如图三接在相邻的桥臂上，实现温度补偿。



图三 工作片补偿法

根据图三可见， R_1 工作片测量纵向应变（压缩为负）， R_2 工作片测量横向应变（拉为正）作为温度补偿片。当试件受力时，工作片 R_1 即变为 $R_1 + \Delta R_{1P} + \Delta R_{1t}$ ，工作片 R_2 变为 $R_2 + \Delta R_{2P} + \Delta R_{2t}$ 。由于 $R_1 = R_2$ ， $\Delta R_{1t} = \Delta R_{2t}$ ，所以有

$$\Delta u_0 = \frac{I}{4} \left(\frac{\Delta R_{1P}}{R_I} - \frac{\Delta R_{2P}}{R_2} \right) u = \frac{I}{4} K (\epsilon_1 - \epsilon_2) u$$

可见温度影响已被消除。由材料力学得知，对一受到压缩（或拉伸）的杆件，当应力不超过此材料的比例极限时，有 $\epsilon_2 = -\mu \epsilon_1$ ，代入上式则有

$$\Delta u_0 = \frac{I}{4} K (1 + \mu) \epsilon_1 u$$

这样只要用仪器读数除以 $(1 + \mu)$ ，即可得到所要测的应变 ϵ_1 了。

这里所讲的温度变化一般指60℃以下测量温度变化引起的误差。在高温测量时，情况比较复杂，这里不多赘述。

除此以外，当我们测量距离比较远时（20米以上），导线的电阻随温度的变化，以及导线间的分布电容都会产生影响。因此我们要尽量缩短距离，调整好仪器的电阻、电容平衡，调好后要尽量减少导线间及导线与试件间的相对移动，以减少电容的变化。还有实验环境的温度，压力效应等也都会给测量带来误差，就不作介绍。

3. 电阻应变仪产生的误差：

每个应变片都有一定的灵敏系数**K**，在使用静态应变仪时，如**K**值在仪器的灵敏系数度盘的刻度范围之内，测量时先要将度盘调到与**K**值相应的刻度上，仪器的读数即为实际的应变值。如果**K**值不在其刻度范围内或使用动态应变仪时（动态应变仪的灵敏系数**K_Y=2**），这时就要进行修正。应变片灵敏系数**K**，测得实际应变 ε ，那么应变片敏感栅的电阻变化则为 $\Delta R / R = K \varepsilon$ ，该信号输入应变仪，当应变仪的灵敏系数为**K_Y**时，仪器的读数为 ε_Y ，因为该读数也是反映应变片的电阻的变化，所以有 $\Delta R / R = K_Y \varepsilon_Y$ ，因此 $K \varepsilon = K_Y \varepsilon_Y$ ，即 $\varepsilon = K_Y \varepsilon_Y / K$ ，**K_Y=2** 时则有 $\varepsilon = 2 \varepsilon_Y / K$ 。

此外使用非标准阻值的应变片时，也会带来误差，必须进行修正；灵敏系数度盘刻度不准，其电位器磨损等同样也会引起测量的误差。

仪器的读数误差，一般不超过其最小刻度的一半，其误差可表示为

$$\delta = \pm (\text{仪器最小刻度} / 2 \times \text{所测应变值}) \times 100\%$$

还有动态应变仪的振幅特性在仪器的线性输出范围内，对一定的测量频率，输出电流与输入应变信号之间存在非线性误差；频率特性在仪器工作频率范围内，对一定的应变值，当测量频率变动时，应变仪输入的幅度变化产生误差；稳定性误差，也即在测量时产生零点漂移以及输出灵敏度变化（动漂）；还有标定电路的误差、记录仪器的误差等等。记录仪的误差主要是记录曲线取值引进的误差，它与记录曲线的线宽，曲线的波峰大小，度量工具，人的视差等有关。一般在±3%或±5%以内，一般直尺量度波峰，其其最大绝对误差可控制在0.5mm，其相对误差为

$$\delta = \pm (0.5 / \text{波峰毫米数}) \times 100\%$$

另有记录仪器方面及温度带来的误差，在这不作详细的叙述。

附 录

单位换算表

长度单位换算表

例：1 米=3.281 英尺

	厘 米	英 寸	英 尺	米	公 里	英 里
厘 米	1.0	0.3937	0.0328	0.01	10^{-5}	6.215×10^{-6}
英 寸	2.540	1.0	0.0833	0.0254	2.54×10^{-5}	1.578×10^{-5}
英 尺	30.48	12.0	1.0	0.3048	3.048×10^{-4}	1.894×10^{-4}
米	100.0	39.37	3.281	1.0	10^{-3}	6.215×10^{-4}
公 里	10^5	3.937×10^4	3281	10^3	1.0	0.6215
英 里	1.609×10^5	63360	5280	1609	1.609	1.0

质量单位换算表

例：1 公斤=2.205 磅

	克	公斤（千克）	磅
克	1.0	10^{-3}	2.205×10^{-3}
公斤（千克）	10^3	1.0	2.205
磅	453.5	0.4536	1.0

能量单位换算表

例：1 公斤米=2.342 卡

	尔 格	焦 耳	公斤米	英尺磅	卡	千 卡
尔 格	1.0	10^{-7}	1.02×10^{-8}	7.37×10^{-8}	2.388×10^{-8}	2.388×10^{-11}
焦 耳	10^7	1.0	0.102	0.737	0.2388	2.388×10^{-4}
公斤米	9.807×10^7	9.807	1.0	7.231	2.342	2.342×10^{-3}

英尺磅	1.356×10^7	1.356	0.1383	1.0	0.3238	3.238×10^{-4}
卡	4.187×10^7	4.187	0.427	3.088	1.0	10^{-3}
千卡	4.187×10^{10}	4187	426.9	3088	10^3	1.0

应力单位换算表

例：1 巴=14.503 磅/英寸²

	巴 bar	千巴	达因/厘米 ²	标准大气压 atm	公斤力/厘米 ² kgf/cm ²
巴	1.0	10^{-3}	10^6	0.9869	1.0197
千巴	10^3	1.0	10^9	0.9869×10^3	1.0197×10^3
达因/厘米 ²	10^{-6}	10^{-9}	1.0	0.9869×10^{-6}	1.0197×10^{-6}
标准大气压	1.0133	1.0133×10^{-3}	1.0133×10^6	1.0	1.0333
公斤力/厘米 ²	0.9807	0.9807×10^{-3}	0.9807×10^6	0.9678	1.0
磅/英寸 ²	6.895×10^{-2}	6.895×10^{-5}	6.895×10^4	6.805×10^{-2}	7.031×10^{-2}
帕斯卡	10^{-5}	10^{-8}	10	0.9869×10^{-5}	1.0197×10^{-5}
兆帕斯卡	10	10^{-2}	10^7	9.869	10.197
千兆帕斯卡	10^4	10	10^{10}	0.9869×10^4	1.0197×10^4

	磅/英寸 ²	帕斯卡 Pa	兆帕斯卡 MPa	千兆帕斯卡	
巴	14.503	10^5	10^{-1}	10^{-4}	
千巴	14.503×10^3	10^8	10^2	10^{-1}	
达因/厘米 ²	14.503×10^{-6}	10^{-1}	10^{-7}	10^{-10}	
标准大气压	14.695	1.0133×10^5	0.1013	1.0133×10^{-4}	
公斤力/厘米 ²	14.223	0.9807×10^5	0.9807×10^{-1}	9.807×10^{-5}	
磅/英寸 ²	1.0	6.895×10^3	6.895×10^{-3}	6.895×10^{-6}	
帕斯卡	14.503×10^{-5}	1.0	10^{-6}	10^{-9}	
兆帕斯卡	145.03	10^6	1.0	10^{-3}	
千兆帕斯卡	14.503×10^4	10^9	10^3	1.0	

地球内部静压力随深度的变化

深度	4	10	35	100	1000	地核表面	地心
----	---	----	----	-----	------	------	----

km						(2900)	(6400)
静压力 GPa	0.1	0.27	1	3	30	130	350

部分常见岩石、矿物及材料的物理性质

[illegible]

弹性常数间的关系

K	E	λ	ν	ρV_P^2	$\rho V_S^2 = \mu$
$\lambda + 2\mu/3$	$\mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}$		$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$\lambda + 2\mu$	
	$9K \frac{K - \lambda}{3K - \lambda}$		$\frac{\lambda}{3K - \lambda}$	$3K - 2\lambda$	$3(K - \lambda)/2$
	$\frac{9K\mu}{3K + \mu}$	$K - 2\mu/3$	$\frac{3K - 2\mu}{2(3K + \mu)}$	$K + 4\mu/3$	
$\frac{E\mu}{3(3\mu - E)}$		$\mu \frac{E - 2\mu}{3\mu - E}$	$E/(2\mu) - 1$	$\mu \frac{4\mu - E}{3\mu - E}$	
		$3K \frac{3K - E}{9K - E}$	$\frac{3K - E}{6K}$	$3K \frac{3K + E}{9K - E}$	$\frac{3KE}{9K - E}$
$\lambda \frac{1 + \nu}{3\nu}$	$\lambda \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$			$\lambda \frac{1 - \nu}{\nu}$	$\lambda \frac{1 - 2\nu}{2\nu}$
$\mu \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$2\mu(1 + \nu)$	$\mu \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$		$\mu \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}$	
	$3K(1 - 2\nu)$	$3K \frac{\nu}{1 + \nu}$		$3K \frac{1 - \nu}{1 + \nu}$	$3K \frac{1 - 2\nu}{2 + 2\nu}$
$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$		$\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$		$\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{E}{2 + 2\nu}$
$\rho \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right)$	$\frac{9\rho V_S^2 R_2^2}{3R_2^2 + 1}$	$\rho(V_P^2 - 2V_S^2)$	见*		

$$* 2\nu = (R_1^2 - 2)/(R_1^2 - 1) = (3R_2^2 - 2)/(3R_2^2 + 1) = 2(3R_3^2 - 1)/(3R_3^2 + 1)$$

表中： K = 体积模量； E = 杨氏模量； μ = 剪切模量； β = 压缩系数 = $1/K$ ； λ = 拉梅常数； ν = 泊松比； ρ = 密度； $R_1 = V_P/V_S$ ； $R_2^2 = K/(\rho V_S^2)$ ； $R_3^2 = K/(\rho V_P^2)$ 。

几种岩石的摩擦系数

花岗岩	辉长岩	砂 岩	大理岩	橄榄岩
0.5-0.7	0.2-0.7	0.5-0.7	0.4-0.8	0.3-0.5

岩石孔隙度和渗透率的实验室测定结果

岩 石	孔隙度 (%)	渗透率 (达西)
辉绿岩	0.1	10^{-9}
辉长岩	0.2	$10^{-7}-10^{-9}$
白大理岩	0.3	$10^{-3}-10^{-8}$
灰 岩	0.3	$10^{-2}-10^{-10}$
花岗岩 (Westerly)	0.9	10^{-8}
砂 岩	2.0	10^0-10^{-4}
灰 岩 (Bedford)	12	$10^{-2}-10^{-10}$
凝灰岩	40	