

实验指导书

机械工程测试技术基础



浙江大学机械制造及其自动化实验室

二〇〇八年十月

目 录

实验一	振动测试与分析综合实验.....	3
实验二	同频检测实验.....	13
实验三	传感器综合实验.....	24
实验四	周期信号的傅立叶分析实验.....	56

实验一 振动测试与分析综合实验

1. 简支梁共振曲线测绘

一、实验目的

通过简支梁共振曲线的测绘，了解单自由度强迫振动的一般规律，验证简化模型的近似程度。

二、实验的要求

- 1、测绘简支梁中部位移的幅频特性曲线。
- 2、从测绘曲线求取振动系统的阻尼比。
- 3、测定简支梁的一阶固有频率 f 。
- 4、通过实验熟悉有关测振仪器的选择和使用方法（重点放在电荷放大器和加速度计的使用上）。

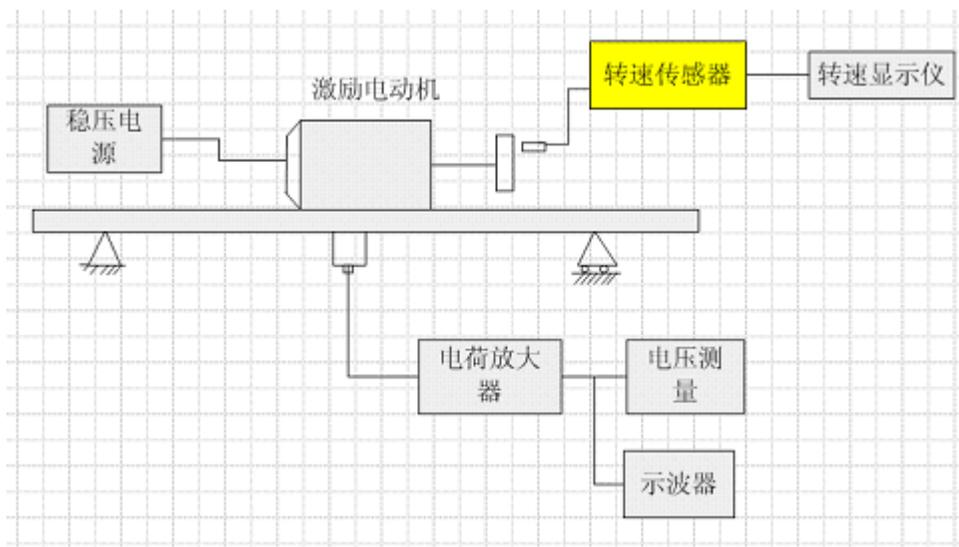


图 1.1 简支梁共振曲线测绘装置

三、实验装置及框图

- NJK-5002 霍尔转速传感器
- EE1641B1 转速数字显示仪
- TS1102 压电晶体加速度计
- DF2175 电子毫仪表
- TS5886 电荷放大器

四、测绘的方法及原理

1、通过直流稳压电源的粗调及细调旋钮可平稳地调节小电机的供电电压、达到小电机无级变速的目的。

2、小电机轴上装一带偏心重的法兰，法兰端面装有一磁钢，霍尔传感器端面对准磁钢，因而小电机每转一周产生一个方波，经放大整形送给数字频率计、计算每秒钟小电机的转数；或小电机每转的时间—即周期。

3、简支梁的小电机偏心重量离心力的激励下产生简谐振动，装在简支梁中部的压电晶体加速度计便输出一个正比于该点加速度值的电荷量，经电荷放大器放大，并转换成正比于加速度的电压值，由毫伏表读出电压的数值，经换算可求出简支梁中部的位移。

五、实验步骤

1、按方框接线、经指导教师检查无误方能接通电源。

2、几台主要仪器的调整步骤及注意事项：

a. 传感器一定要与测定表面保持基本垂直，转动法兰霍尔传感器发光二极管有明显指示。

b. 如发现毫伏表指针不稳定，测频有困难，可改用测周期的办法。

c. 毫伏表表头读数是有效值。

d. 加速度计的输出线要用胶纸固定在梁上。

e. 根据加速度计电荷灵敏度数值调整电荷放大器“传感器灵敏度”旋钮，使之与之相符。将“电荷放大器输出”旋钮调整到 100mv/unit 位置，开机后注意“传感器灵敏度”旋钮间指示灵敏度位数的小红灯应数的小红灯应与加速度电荷灵敏度位数的相符合。

f. 在测试过程中不能随意切断电源，实验完毕后应先关掉所有仪器后于最后切断总电源。

3. 共振点附近频率微小的变化，输出电压会有很大的波动，为了使求得阻尼比更精确，共振点左右的测点要加多，将测得数据填入表 1。

4. 记下简支梁的结构参数

简支梁的结构参数

梁长 $l = 750mm$ 梁截面 $b \times h = 60 \times 60 \text{ mm}^2$

偏心重量 = 0.003kg 偏心半径 $r = 15mm$

梁重 = 201kg 电机重 = 1.4kg

$E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ $J = \frac{1}{12}bh^3 = 0.108cm^4$

E : 弹性模量 J : 惯性矩

表 1 实验数据记录及计算表

序号	数据项 频率 Hz	频率比	毫伏表 读数 m v	峰值 有效 值× 1.414	ω_2	加速度 $a(\text{mm/s}^2)$ 峰值×1000/ 电荷放大器输 出	位移 mm $X=a/\omega^2$	
1	7							加速度计 灵敏度 (pc/ms^{-2})
2	8							
3	9							
4	10							电荷放大器 输出 (mv/ms^{-2})
5	11							
6	12							固有频率 (f_0)
7	13							
8	14							
9	14.5							
10	15							
11	16							
12	17							
13	18							
14	19							
15	20							

六、结果分析

1、 将梁的刚度，固有频率的实测数值与计算数值加以比较

实测固有频率 f_0 (次/s)	计算固有频率 f_0 (次/s)	测 算 刚 度 系 数 [kg/mm]	计 算 刚 度 系 数 [kg/mm]
相对误差	%	相对误差	%

- 2.根据实测数据用方格纸绘制幅频曲线,纵座标为位移,横座标为频率比。
- 3.则测绘得的幅频曲线共振峰的半功率点求取阻尼比 ζ 。(注意横坐标要拉开,否则曲线并在一起,求得的阻尼比误差甚大)。
- 4.以测绘所得阻尼比用近似方法计算共振点的幅值,与实测数值加以比较,并分析其不一致的原因。

附录:

实验用的简支梁可以简化成一个单自由度的振动系统,其质量为 w/g , 弹簧刚度系数为 K 、阻尼系数为 C 。

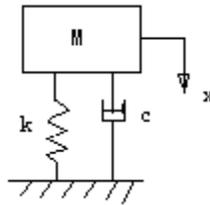


图 1.2. 单自由度系统的力学模型

由近似计算法如

$$W = \frac{17}{35} W_1 + W_2$$

式中 W_1 ——梁的重量 (kg)

W_2 ——小电机与偏心轮总重量(kg)

$$d = \frac{Wl^3}{48EJ}$$

故

$$K = \frac{48EJ}{l^3}$$

系统的固有频率:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{W}}$$

用偏心轮产生的不平衡作为干扰力时

$$F = \frac{Prw^2}{g} \sin wt$$

故对于上述振动系统的微分方程式为

$$X + 2nX + w_0^2 X = \frac{Prw^2}{W} \sin wt$$

式中

$$2n = \frac{C}{w/g} \quad w_0^2 = \frac{K}{w/g}$$

其强迫振动的振幅为

$$X = \frac{Pr}{W} \frac{h^2}{\sqrt{(1-h^2)^2 + 4z^2h^2}}$$

式中 $h = \frac{w}{w_0}$ 频率比 = $S \frac{w}{w_0}$ 阻尼比

共振时近似于 $w = w_0$ $X = \frac{Pr}{W} \frac{1}{2z}$

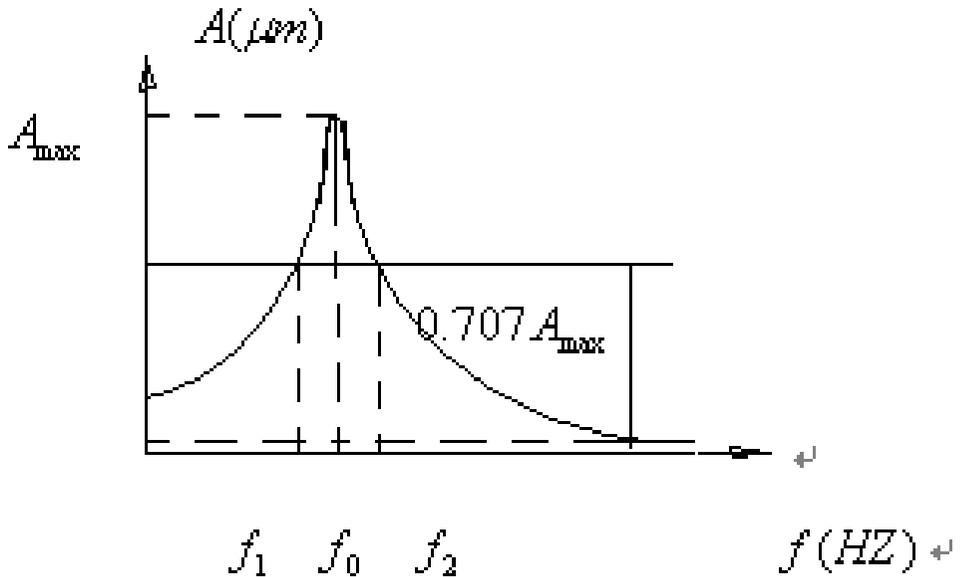


图 1.3. 简支梁振动幅频特性曲线

图 1.3.中, A_{max} 为简支梁系统共振时的振幅; f_0 为系统固有频率, f_1 、 f_2 为半功率点频率。

振幅为 A_{max} 时的频率叫共振频率 f_0 。在有阻尼的情况下, 共振频率为:

$$f_a = f_0 \sqrt{1 - 2z^2}$$

当阻尼较小时, $f_a \approx f_0$ 故以固有频率 f_0 作为共振频率 f_a 。在小阻尼情况下可得

$$z = \frac{f_2 - f_1}{2f_0}$$

f_1 、 f_2 的确定如图 1.3. 所示。

2. 振动信号的 FFT 分析

一、实验目的

1. 了解采用 LabVIEW 虚拟式仪器的结构原理和组建振动信号分析实验的方法；
2. 学会用计算机、数据采集卡对振动信号进行数据采集，学会用虚拟式 FFT 分析仪对振动信号进行信号分析；
3. 掌握常用的信号分析方法。

二、实验装置

1. 简支梁振动装置
2. 加速度传感器
3. 电荷放大器
4. 虚拟仪器

三、实验原理

对振动信号进行分析，通常需完成数据采集，信号时域分析，幅值域分析和频谱分析。以下对这一分析原理作一简介。

1. 数据采集

本仪器数据采集主要是振动信号经 A/D 进行采样。A/D 采样的目的是对被分析的振动信号进行时间离散和幅值量化。A/D 采样遵循的基本定理是采样定理。下面对这一定理作一描述。

采样是从固定的时间间隔 (Δt) 依次抽取连续信号不同时刻瞬时幅值的过程，称 Δt 为采样时间间隔， $f_s = 1/\Delta t$ 为采样频率。对一个截止频率为 f_c 的频限信号的无限持续时间历程 $x(t)$ 进行采样的过程，就是用一个脉冲序列 $\sum_{n=-\infty}^{\infty} d(t - nT_s)$ (抽样函数) 对连续时间历程 $x(t)$ 进行脉冲调制的过程，得到采样的时间系列 $\overline{x(t)}$ 为：

$$\overline{x(t)} = \overline{x(nT_s)} = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(t - nT_s) \quad (1)$$

式中： $T_s = \Delta t$ 称为采样周期， $f_s = 1/T_s$

对式 (9-1) 两边分别取傅里叶变换得

$$\overline{X(f)} = x(f) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(t - nT_s) \quad (2)$$

据 d 函数的卷积特性，信号采样后的频谱为信号采样前的频谱的周期性延拓。当 $f_s \geq 2f_c$ 时， $\overline{X(f)}$ 只有反复，没有重叠；当 $f_s \leq 2f_c$ 时， $\overline{X(f)}$ 在反复中出现重叠，谱形发生畸变。

为了避免出现频域的重叠，采样频率 f_s 与信号截止频率之间必须满足

$$f_s \geq 2f_c \quad (3)$$

不等式 (9-3) 就是采样定理。在具体采样过程中还应该尽量作到：

- (1) 样前，须进行抗混滤波，去掉不必要的高频成份。
- (2) 通常选用采样频率大于信号截止频率 5~10 倍。

2. 振动信号的时域分析

假设采样所得原始数据序列为 $\{x_n\}$ ($n = 0, 2, \Lambda, N-1$)

a. 均值:
$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \quad (4)$$

b. 均方值:
$$y_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 \quad (5)$$

c. 方差:
$$d_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)^2 \quad (6)$$

此外还可以进行概率密度函数估计，自相关函数估计。

3. 振动信号的频域分析

对振动信号作自功率谱密度函数估计的步骤如下：

- a. 根据需选择合适窗函数，如汉明窗、海宁窗等。
- b. 对原始数据序列进行使其均值为零的零均值化处理。
- c. 确定添加零的个数 (N_x)，使满足 $N = N_0 + N_x = 2^p$ 。
- d. 对数据系列 $\{x_n\}$ 进行加窗处理，即将 $\{x_n\}$ 与谱窗函数相乘。
- e. 用快速傅里叶变换 (FFT) 计算：

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (k = 0, 1, 2, \Lambda, N-1) \quad (7)$$

其对应的离散频率值为 $f_k = \frac{f_s}{N} \cdot k$

f. 自功率谱密度函数为：

$$G_k = \frac{1}{N} |x_k|^2 \quad (k = 0, 1, 2, \Lambda, N-1) \quad (8)$$

四、实验方法

1. 将加速度传感器置于简支梁上，运行简支梁动态数据采集程序，按要求设置加速度传感器的灵敏度和电荷放大器的增益并调整好采样频率。

2. 用激振锤敲击简支梁的中部，并同时运行虚拟 FFT 分析仪，就可以进行简支梁振动信号的时域分析，幅值域分析和频谱分析。

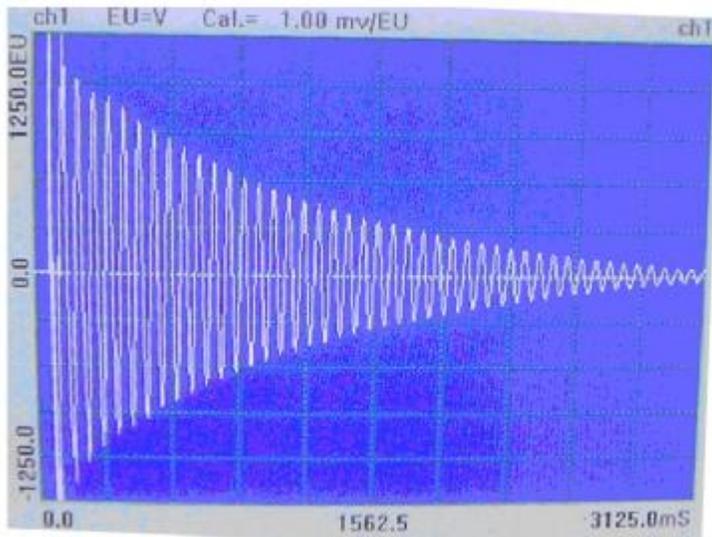


图 1.4 简支梁冲击激励下的自由振动波形

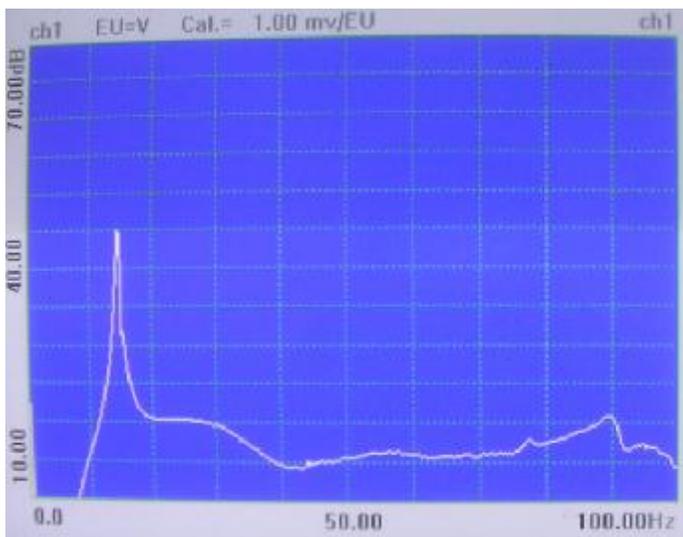


图 1.5 简支梁自由振动幅频特性

五、实验结果与分析

1. 要求同学们仔细观察简支梁冲击激励下的自由振动波形、自由振动幅频特性，并和逐点正弦激励的数据比较；
2. 把分析结果保存，共写实验报告调用。

实验二 TPJ-II 同频检测学习机实验

机械系统动态测试信号中，往往混叠有各种噪声或干扰，而我们感兴趣的可能只是某些特定频率的信号，例如研究机械阻抗，需测出和激振力同频的振动信号。转子动平衡则要求测出和转速一致的同步信号的振幅及相位，并将非同频信号滤除。因此基于互相关原理的“同频检测”技术就成为完成上述任务的重要手段之一，这一技术在动态测试仪和其他测试仪器上都有广泛的应用。

本学习机可以提供一组实验，用以学习相关原理及同频检测技术，特别是了解这些原理的物理实质及其工程应用，注意观察和分析实验现象并与原理的数学表达公式结合起来研究可能是有好处的。

1. 互相关函数 $R_{xy}(t)$ 曲线的绘制

一、实验目的：

学习“同频检测”的理论基础——相关原理，并测试两个周期信号的互相关函数 $R_{xy}(t)$ 。

二、实验原理

相关原理是以信息论和随机过程理论为基础的，为着重说明原理，假设所研究的随机过程是平稳的且满足遍历性条件，均值为零。因此可以用某一样本（或波形）的时间历程的统计参数来描述总体统计参数。

现设 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为两个随机信号（或时间连续波形），其互相关函数为：

$$R_{xy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+t)dt \quad (1-1)$$

式中 t 为延迟时间。

在实际测试时，取“平均”的时间 T 只能是有限的，故可以作近似计算：

$$R_{xy}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+t)dt \quad (1-2)$$

作为一种理论，式（1-2）当然也适用于周期信号，TPJ-II 学习机给出的信号为：

$$x(t) = x_0 \sin \omega t$$

$$y(t) = y_0 \sin \omega t$$

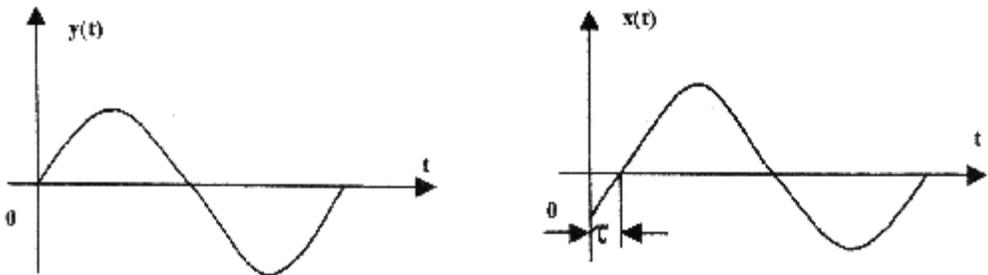


图 2.1 两个周期信号

在周期 T 内平均，则

$$\begin{aligned}
 R_{xy}(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+t)dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T y_0 \sin \omega t \cdot x_0 \sin \omega(t-t)dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T x_0 y_0 \sin \omega t \sin \omega(\omega t - \omega t) dt
 \end{aligned}$$

为了在仪器上实现延迟 t 更方便，用相移 f 代替。所以 $f = \omega t$ 。

$$R_{xy}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x_0 y_0 \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - f) dt$$

$$R_{xy}(t) = \frac{x_0 y_0}{2} \cos f \quad (1-3)$$

$$\text{或 } R_{xy}(t) = \frac{x_0 y_0}{2} \cos \omega t \quad (1-4)$$

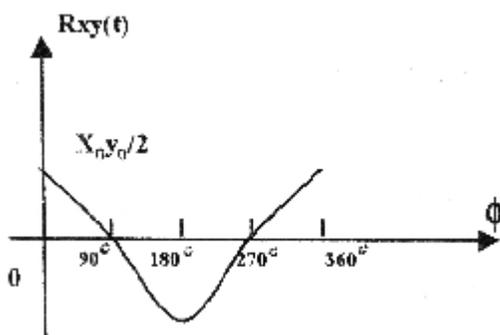


图 2.2 两个周期信号的 $R_{xy}(t)$ 曲线

将式 (1-4) 绘成 $R_{xy}(t)$ 曲线，如图 2.2 所示。

从 (1-4) 式可以看出， $R_{xy}(t)$ 是和 $x(t)$ 、 $y(t)$ 同频的周期信号。而且看到 $f=90^\circ$ 、 270° 时， $x(t)$ 变为余弦函数，而正弦和余弦函数的 $R_{xy}(t)=0$ ，不难证明不同频率的正弦之间（或余弦之间）其互相关函数也为零，它说明：“不同频不相关”，“正弦和余弦不相关”（无论是否同频！）等。这正是“同频检测”理论基础。

三、实验装置与框图

- 1、TPJ-II 型同频检测学习机。
- 2、直流稳压电源。
- 3、DF-4321 二踪示波器。
- 4、DF-1026 信号发生器。

图 3 为 $R_{xy}(t)$ 一般测试框图。

四、实验步骤

- 1、将 TRJ-II 学习机“频率选择”置任一档（如 30Hz）用示波器观察 0° 、 90° 、及 270° 回路正交正弦信号，并观察 0° - 90° 移相输出信号。

（思考题：如何用示波器观察其频率和相角？）

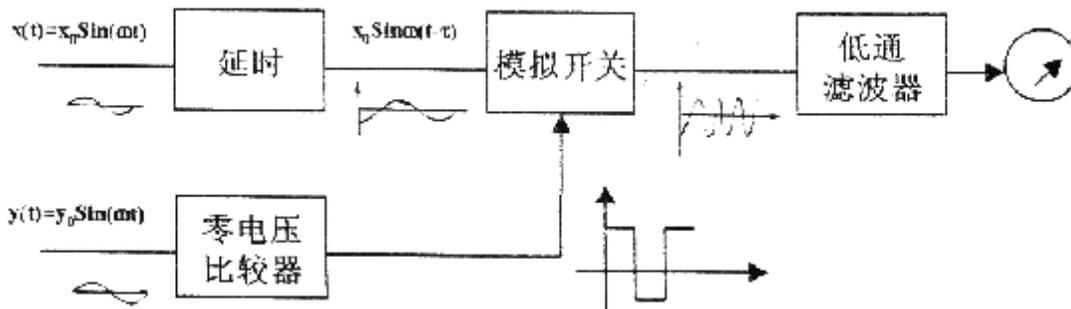


图 2.3 实验装置原理图

2、将“工作选择”开关置“0°”，“模拟信号开关”置“ON”，0° -360° 移相信号自动接入加法器。在 0° 相移时，调节其幅值，使 A 表头为满刻度（即 100 μ A），记下 J13 点的波形及 J9 点方波波形。

3、将 0° -360° 移相信号按四个象限，每象限又按 10° 分挡（共 36 档）调节移相角 f （代表 $y(t)$ 的时间延迟）。分别读出 A 表头示值及相应的 J13 点的波形及 J9 点波形（只画出 0° ， 30° ， 90° ， 120° ， 150° ， 180° ， 210° ， 270° ， 330° ， 350° ，）

表 1 记录表

f	0°	10°	20°	30°	.....	350°
$R_{xy}(t)$						
A 表示值	100					

4、绘制互相关函数 $R_{xy}(t)$ 曲线

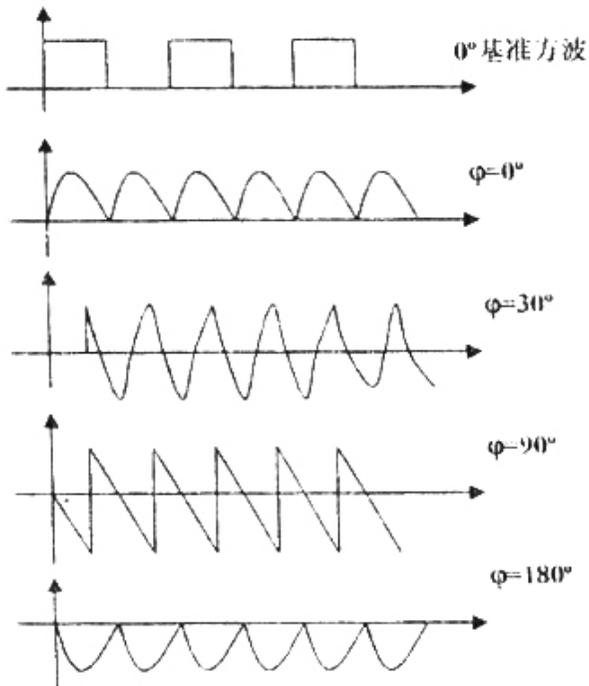


图 2.4 不同相移下的乘法器输出波形

五、思考问题

- 1、相关函数和相关系数有什么关系？
- 2、自相关函数 $R_{xx}(t)$ 和互相关函数 ($R_{xy}(t)$) 有何异同？ $R_{xy}(t)$ 的测试框图怎样画法？
- 3、本实验中，如果输入信号和基准信号都是方波信号，则 $R_{xy}(t)$ 曲线是形状？

2. 信号与噪声的合成及同频检测的排噪能力

一、实验目的

- 1、观察有用测试信号与噪声或干扰的叠加波形，以模拟真实测试信号；
- 2、同频检测器排除噪声的能力，信噪比的测试。

二、实验原理：

通常机械系统测试信号总在一定程度上含有噪声和干扰，“同频检测”是在噪声背景下提取有用信号的重要技术手段之一。

设有用信号为： $x_0 \sin(\omega_0 t + f)$

噪声信号为： $n(t) = \sum_i n_i \sin(\omega_i t + f_i)$

二信号叠加为： $x(t) = x_0 \sin(\omega_0 t + f) + \sum_i n_i \sin(\omega_i t + f_i)$

采用一次无噪声基准信号 $y(t) = y_0 \sin(\omega_j t)$

将 $x(t)$ 和 $y(t)$ 进行互相关处理在 $\tau=0$ 时，求 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数。

$$\begin{aligned} R_{xy}(t=0) &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t)dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+t)dt \quad (2-1) \end{aligned}$$

$y(t)$ 中的频率 ω_j 就是我们感兴趣的信号的频率，式 (2-1) 中这些信号“相乘”并取“平均”无非有三种情况：

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin \omega_i t \sin \omega_j t dt = \begin{cases} \frac{T}{2} (\omega_i = \omega_j) \\ 0 (\omega_i \neq \omega_j) \end{cases}$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin \omega_i t \cos \omega_j t dt = \begin{cases} \frac{T}{2} (\omega_i = \omega_j) \\ 0 (\omega_i \neq \omega_j) \end{cases}$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin \omega_i t \cos \omega_j t dt = 0 (\omega_i = \omega_j \text{ 或 } \omega_i \neq \omega_j)$$

上式中 T 为 ω_i 和 ω_j 的共同期。

式 (2-1) 中如果 $\omega_i = \omega_j$ ，那是与 ω_i 同频的有用信号被检测出来，有常值分量输出，而与 ω_i 不同频的噪声和干扰信号被滤除了。

三、实验装置

DF1026 信号发生器

TPJ-II 学习机

DF2175 毫伏表

DF4320 示波器

四、实验步骤

1、将 TPJ-II 学习机“模拟信号开关”置“ON”，选择频率 $f_0=100(\text{Hz})$ ，相角选 0° ，“工作选择”开关置 0° ，则方波基准信号也为 $f_j=100(\text{Hz})$ ，毫伏表接 J6 点，调整有效信号的幅值为

1000mV, 测出 J6 和 J11 点相应电压值 V_D , V_F 。观察 J6 和 J11 点之波形。用它模拟有用信号。

2、由 DF1026 信号发生器给出 30 (Hz) 正弦信号, 模拟噪声干扰 V_E 注入学习机 J7 点, 调节其幅值为 500mv 1000mv 2000mv 满足 V_D/V_E 。观察并描绘 F 点叠加波形。用毫伏表测量 J7 点及 J11 点电压, 观察并记录 A 表头读数变化。

3、改变 DF1026 输出信号频率为 80(Hz)和 120 (Hz)。重复步骤 (2)。将数据记入下表。

4、画出有用信号, 噪声干扰信号及叠加复杂信号。(在实验报告中只需画 $(V_D/V_E) = 0.5$ 的一组波形。(可参考图 2.5 所示的波形图)。

信 噪 比 $\frac{V_0}{V_E}$	有效信 号 $V_D(\text{mv})$	噪 声 干 扰 $V_E(\text{mv})$	噪 声 干 扰 频 率 30(Hz)		噪 声 干 扰 频 率 80(Hz)		噪 声 干 扰 频 率 120(Hz)	
			V_F (mv)	A 表 读数	V_F (mv)	A 表读数	V_F (mv)	A 表读 数
2	1000	500						
1	1000	1000						
0.5	1000	2000						

5、将 DF1026 输出信号频率调至 300(Hz), 在附近微调, 使保持信噪比 $V_D / V_E = 1$, 观察 F 点波形及 A 表头指示的摆动情况。

说明方波相关对奇次谐波干扰的抑制能力很差, 致使其应用在某些方面受到限制。

五、思考题

比较在叠加噪声时 V_F 的变化和 A 表头的指示变化情况, 试分析原因。

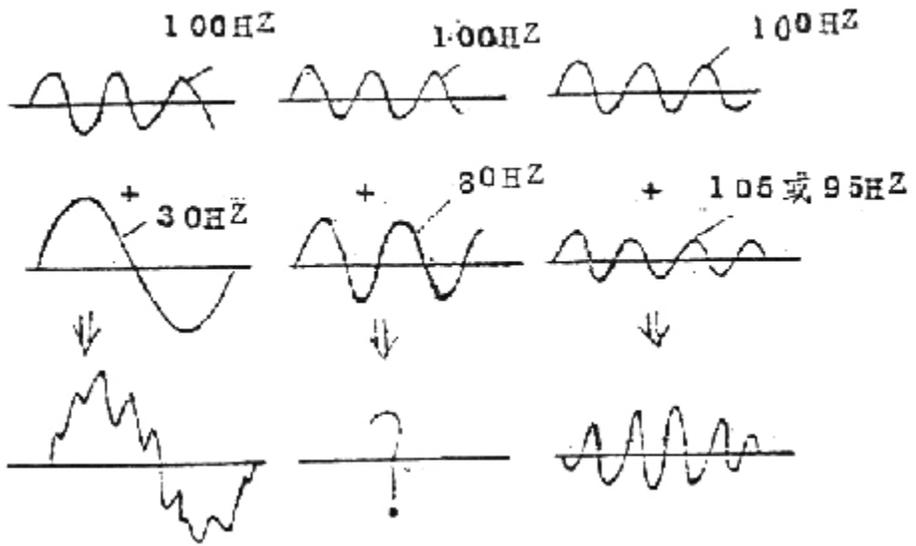


图 2.5 不同信号的叠加波形

3. 相关滤波器特性的测试

一、实验目的：

- 1、了解相关滤波器的工作原理
- 2、测试方波相关的滤波器频率特性。

二、实验原理：

1、为了从含有噪声和干扰的测试信号中测出所需频率范围的信号，常采用“相关滤波器”，其电路结构如图 2.6 。

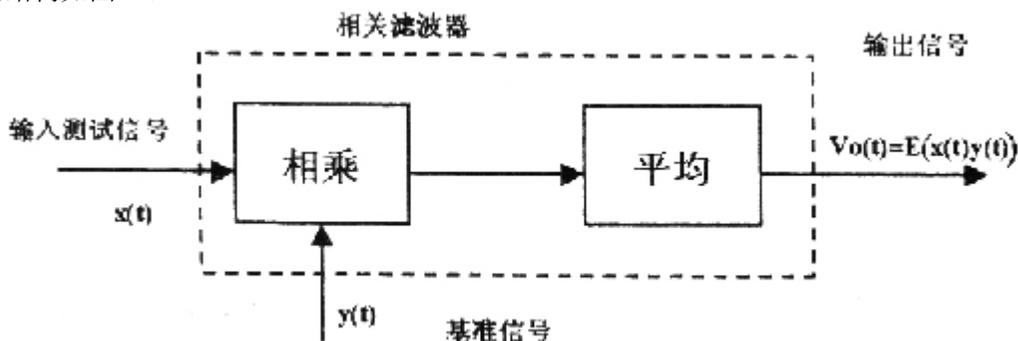


图 2.6 相关滤波器其电路结构

设输入的测试信号为 $X(t)=X_0\sin(\omega_0 t+j)+n(t)$ (3-1)

基准信号 $y(t)=y_0\sin \omega_j t$ 选择 $\omega_j = \omega_0$

(3-1) 式中噪声为： $n(t)=\sum_i x_i \sin(\omega_i t+f_i)$ ，而 $\omega_j \neq \omega_i$ ， $|\omega_i - \omega_0| \gg \omega_c$ ，而 $x_0\sin(\omega_0 t+j)$ 为

有用信号。

“相乘”用乘法器实现

$$\begin{aligned} x(t)y(t) &= [x_0\sin(\omega_0 t+j)+n(t)]y_0\sin \omega_0 t, \\ &= x_0y_0\sin(\omega_0 t+j)\sin \omega_0 t + \sum_i x_i \sin(\omega_i t+j_i) \end{aligned}$$

$$x(t)y(t) = \frac{x_0y_0}{2} \cos j - \frac{x_0y_0}{2} \cos(2\omega_0 t+j) + \sum_i \frac{x_0y_0}{2} \cos[(\omega_i - \omega_0)t+j_i] - \frac{x_0y_0}{2} [(\omega_i + \omega_0)t+j_i]$$

“平均”采用低通滤波器实现，其截止频率为： $\omega_c = \frac{2p}{t_c}$ ， $t_c = RC$ ，我们选取 ω_c 足够小，或者

说低通的时间常数 t_c 足够大时。

$$E[x(t)y(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \int x(t)y(t)dt = \frac{x_0y_0}{2} \cos j \quad (3-2)$$

通常选取 $\omega_c = \omega_0$ ，所以 $\sum \omega_0$ ， $(\omega_j + \omega_0)$ ， $\omega_j - \omega_0$ 。等一切在低通截止频率 ω_0 之外的噪声干扰信号全部滤除。只有和基准信号“同频”的有用信号才有均值输出，它包含着幅值 x_0 和初相 ϕ 的信息，有时相关滤波器也叫做“同频查测器”或“相敏检波器”，通常基准信号是正交的正、余弦两个信号。（思考：为什么？）

2. 现进一步说明正弦为基准信号的相关滤波器的滤波特性，即-3db 带宽和 Q 值等。为了便于研究带宽，设 $\omega_0 \neq \omega_i$ ， $\omega_i \neq \omega_j$ ，且 $\omega_i - \omega_j = \omega_c$

并设测试信号为 $x(t) = x_0 \sin(\omega_0 t + j) + n(t)$

$$n(t) = \sum_i x_i \sin(\omega_i t + j_i)$$

基准信号 $y(t) = y_0 \sin(\omega_j t)$

则 $x(t)y(t) = x_0 y_0 \sin(\omega_0 t + j) \sin \omega_j t + y_0 n(t) \sin \omega_j t$

$$= \frac{x_0 y_0}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_j)t + j] - \frac{x_0 y_0}{2} \cos[(\omega_0 + \omega_j)t + j]$$

$$+ \sum_i \frac{x_0 y_0}{2} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + j_i] - \cos[(\omega_i + \omega_j)t + j_i]$$

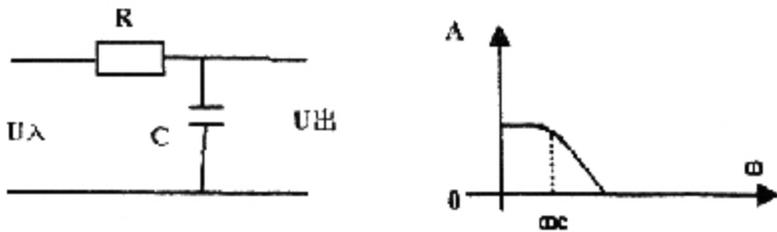


图 2.7 低通滤波器

可见“相乘”之后的信号包含 $(\omega_0 - \omega_j)$ ， $(\omega_0 + \omega_j)$ ， $(\omega_i - \omega_j)$ ， $(\omega_i + \omega_j)$ 等和频及差频信号。从理论上讲，平均的时间无限长时， $E[X(A)Y(A)] = 0$ ，那低通滤波器常数 t_0 ，为无穷大，实际上 t_0 只能取有一个相应的数值，当 ω_0 较小，而 $|\omega_0 - \omega_j| < \omega_c$ 时，显然平均电路的输出为 $\frac{x_0 y_0}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_j)t + j]$ 之差频信号，其它频率如 $(\omega_0 + \omega_j)$ ， $|\omega_i \pm \omega_j|$ 诸信号全被滤除。

从图中可以看出相关滤波器是恒带宽窄带滤波器，其-3db 带宽为 2ω ，它决定于平均电路低通的时间常数 t_0 ， t_0 越大则通带越窄，滤除噪声的能力越高，但达到均值的时间相应地加长，动态性能下降。因此 t_0 的选择是重要的，要兼顾上述二个因素。

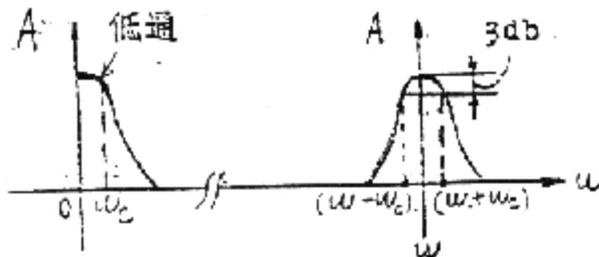


图 2.8 正弦相关滤波器频率特性

滤波器的品质因素 $Q = \frac{\omega_j}{2\omega_c} = \frac{f_j}{2f_c}$ 如中心频率 $f_j = 100\text{Hz}$ ，而 $f_c = 1\text{Hz}$ ，则 $Q = 500$ ，

3. 为了用简单电路实现“相乘”，TPJ-II 学习机采用了方波作为相关基准号，组成方波相关滤

波器。

“相乘”利用场效应管组成的模拟开关电路完成。根据付里叶级数将 0° 方波展开为：

$$y(t) = \frac{4y_o}{p} \left(\sin w_j t + \frac{1}{3} \sin w_j t + \frac{1}{5} \sin w_j t + \mathbf{K} + \frac{1}{i} \sin w_j t + \mathbf{K} \right)$$

方波相关可以看成是 $x(t)$ 与基准方波 $y(t)$ 中的基波以及各奇次谐波分别相关，然后叠加，形成各奇次谐波为中心频率而幅值递减的梳齿状滤波器。-3db 带宽是相同的，都是 $2w_c$ 。

从原理上看，有可能在方波相关滤波器中混入奇次谐波干扰，特别是三次谐波干扰，而高谐奇次谐波幅值很小，影响较小，但由于电路简单可靠，此方案有仍广泛应用于动平衡和某些动态测试仪上。

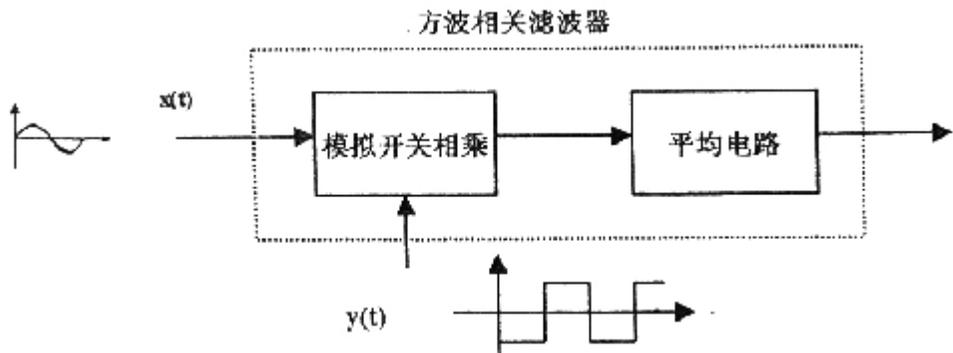


图 2.9 相关滤波器的原理

三、实验装置：

1. TPJ- II 同频检测学习机

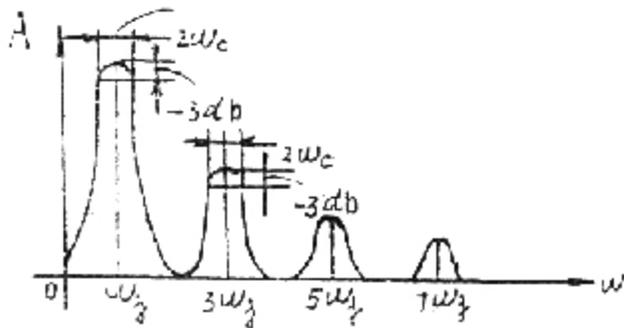


图 2.10 相关滤波器特性曲线

2. 直流稳压电源。
3. DF4320 二踪示波器。
4. DF1026 信号发生器。
5. DA-16 晶体管毫伏表。

四、实验步骤

1. 在 TPJ- II 学习机上选择基准信号 $y(t)$ 频率，即为相关滤波器的中心频率 $w_i = 2pf_j$ ，取 $f_j = 30(\text{Hz})$ 。

将“工作选择”置“关”，将 $0^\circ \sim 360^\circ$ 移相输出接至 J8 端，幅值 (1.5~2) V。经电路形

成基准方波用示波器观察波形。

2. “模拟信号开关” KD 置“关”。用 DF1026 信号发生器输出 30 (Hz) 的正弦信号，幅值 1(v)。用示波器观察乘法器的输出波形，微调 DF1026 信号发生器输出的频率使 TPJ-II 之 A 表头指示稳定无摆动（即 $f_j=f_0$ ）。调整移相角使两信号显示 0° 相角，并调整 DF1026 信号发生器输出幅值使 A 表头达满刻度（100%）记下 DF1026 信号发生器输出幅值读数，并使保持不变。

（注意：这步操作是实验的关键，一定要注意保持两个信号的同频和零相差！）

3.保持 DF1026 信号发生器输出幅值不变，微调频率，使其偏离 $f_j=30(\text{Hz})$ ，A 表头指示发生差频摆动，当 A 表头摆幅为满度 70.7%时，记下 DF1026 信号发生器的频率即 $f_j \pm f_0$ ，也就是-3db 的频率。

4.以 $f_0=f_j \pm 1\text{Hz}, \pm 2\text{Hz}, \pm 3\text{Hz}, \pm 4\text{Hz}, \pm 5\text{Hz}, \dots$ 调整 DF1026 信号发生器频率，保持幅值不变，分别记下 A 头相应的最大摆幅。画出 $f_j=30\text{Hz}$ 的相关滤波器频率特性。

5.调整 DF1026 信号发生器频率为 $f_i(i=2,3,4,5,\dots)$ ，保持 DF1026 信号发生器输出幅度不变。当 A 表头读数稳定时，记下相应 A 表的相应读数，画出梳齿滤波器的频率特性曲线。

6.将基准信号频率， f_j 改为 100(Hz)。TPJ-II “频率选择”置“100”，重复步骤(2)(3)(4)，画出 $f_j=100(\text{Hz})$ 为中心频率的滤波器特性，说明互相关滤波器具有中心频率“自动跟踪”的特性。

$f_j=30(\text{Hz})$ $V_D=$ (V) 表 3

$f_0(\text{Hz})$	$f_j=30$	f_j+1	f_j+2	f_j+3	f_j+4	f_j+5	.....	.....	f_j-1	f_j-2	f_j-3	f_j-4	.....
表头 读数 (μA)	100												

$f_c=?$

$f_j=30(\text{Hz})$ $V_D=$ (V) 表 4

$f_0(\text{Hz})$	f_j	$2f_j$	$3f_j$	$4f_j$	$5f_j$	.....
A 表读数	100					

五、思考题：

DF1026 信号发生器输出信号频率 f_0 ，偏离中心频 f_j 越大则 A 表头摆动越快，而相应摆幅越小，为什么？

4. 频谱分析实验

一、实验目的：

了解复杂时域信号的频率结构及谱分析方法

二、实验原理：

在许多测试领域中，要求了解信号的频率成分，而找出这些成分的频率，幅值和相位，就能为分析振源及其影响的大小和进而消除振源提供依据。

本频谱分析装置是由 TPJ- II 同频检测学习机和信号发生器组成的，用一手动扫频信号转换成同频方波信号，与被分析的信号“相乘”然后“平均”，凡和基准方波同频的信号将有常值输出，扫描信号的频率就是相关滤波器中心频率，在扫描过程中可将分析的信号中各个频率的信号逐一测出。

三、实验装置：

1. TPJ- II 同频检测学习机；
2. 直流稳压电源；
3. DF4320 二踪示波器；
4. DF1026 信号发生器 2 台。

四、实验步骤：

1. 将 TPJ- II 学习机的“模拟信号开关”(KD)置“开”，“频率选择”置 30(Hz)，调节幅值 V_D 为 1(V)左右。

“工作选择”置“关”

2. 在 J7 点(“模拟干扰信号”端)用 DF1026 信号发生器输入 50(Hz)正弦信号(也可用其它信号源产生)，幅值 1.5(V)，在 J11 点观察叠加的复杂波形并作记录。

3. 将扫频信号源(如 DF1026 信号发生器手调代替)，接入 J8 端(“模拟同频光电信号”端)，经零电压比较器变成扫频方波信号，输入电压幅值 1.5~2 (V)，将扫频频率由低至高调节，当微调扫频频率使 A 表头指示稳定，并注意使二信号之相角差调整为零度，此时记下 A 表头数，即为此频率的幅谱的大小。然后把其它谱线逐一测出。

4. 画出幅谱图

它是离散的谱线。

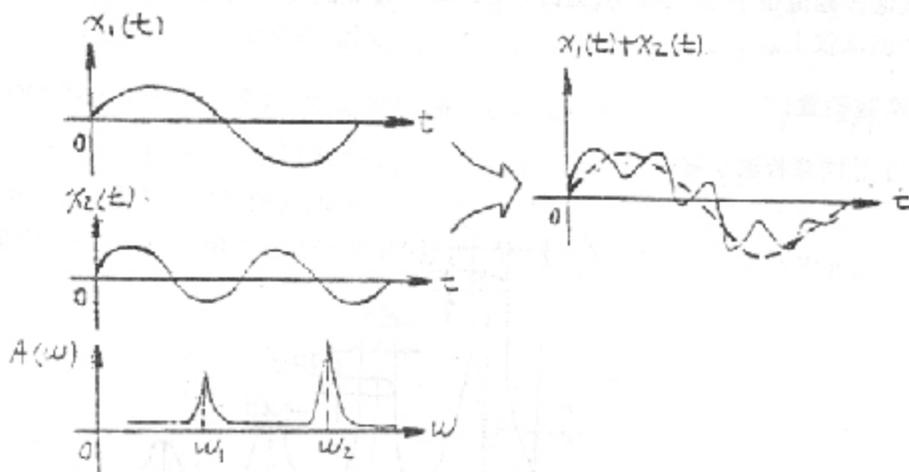


图 2.11 时域频域波形图

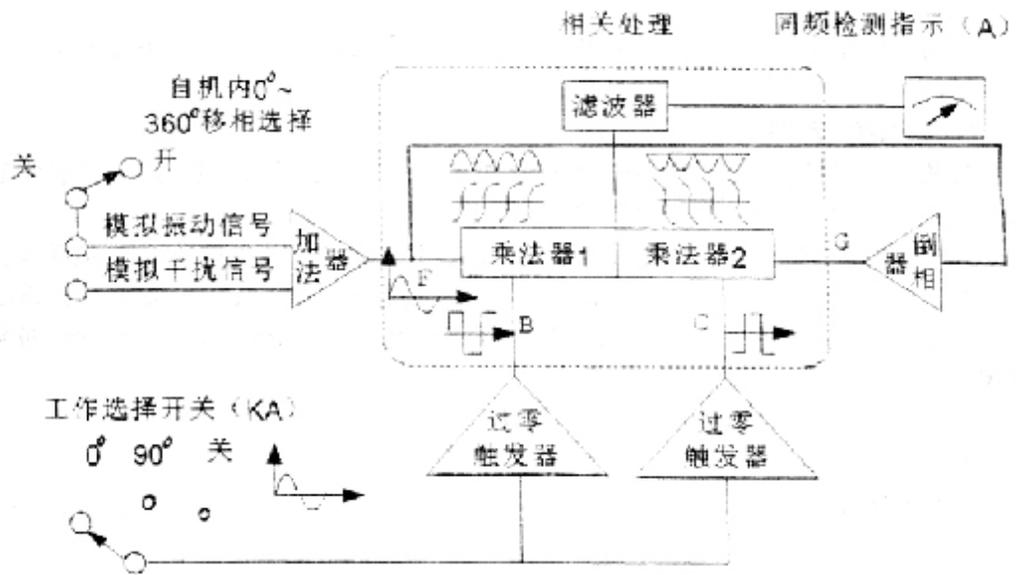


图 2.12 同频检测学习机组成

实验三 传感器综合实验

1. 金属箔式、半导体应变片性能—单臂电桥、半桥、全桥交直流实验

一、实验目的：

- 1、观察了解箔式应变片的结构及粘贴方式；
- 2、熟悉箔式应变片和半导体应变片的性能，充分了解两种应变电路的特性；
- 3、掌握应变片单臂、半桥、全桥的工作原理和工作情况；
- 4、验证应变片单臂、半桥、全桥的性能及相互之间的关系。

二、实验原理：

应变片是最常用的测力传感元件。当用应变片测试时，应变片要牢固地粘贴在测试体表面，测件受力发生形变，应变片的敏感栅随同变形，其电阻值也随之发生相应的变化。通过测量电路，转换成电信号输出显示。

电桥电路是最常用的非电量电测电路中的一种，当电桥平衡时，桥路对臂电阻乘积相等，电桥输出为零，在桥臂四个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 中，电阻的相对变化率分别为 $\Delta R_1 / R_1$ 、 $\Delta R_2 / R_2$ 、 $\Delta R_3 / R_3$ 、 $\Delta R_4 / R_4$ ，桥路的输出与

$e_R = \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}$ 成正比。当使用一个应变片时， $e_R = \frac{\Delta R}{R}$ ；当使用二个应变片时， $e_R = \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2}$ ；若二个应变片组成差动状态工作，则有 $e_R = \frac{2\Delta R}{R}$ ；用四个应变片组成二个差动对工作，且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ， $e_R = \frac{4\Delta R}{R}$ 。

根据戴维南定理可以得出电桥的输出电压近似等于 $\frac{1}{4} \cdot E \cdot e_R$ ，电桥的电压灵敏度 $K_u = V / \Delta R / R$ ，于是对于单臂、半桥和全桥的电压灵敏度分别为 $\frac{1}{4} \cdot E$ 、 $\frac{1}{2} \cdot E$ 、和 E 。

由此可知，单臂、半桥、全桥电路的灵敏度依次增大；当 E 和电阻相对变化一定时，电桥的输出电压及其电压灵敏度与各桥臂阻值的大小无关。

由此可知，单臂、半桥、全桥电路的灵敏度依次增大；当 E 和电阻相对变化一定时，电桥的输出电压及其电压灵敏度与各桥臂阻值的大小无关。

四、实验设备：

1. DF4321 示波器、
2. 贴于主机工作台悬臂梁上的箔式应变计、半导体应变计、螺旋测微仪、
3. 数字电压表、应变加热器。

五、实验步骤:

1、差动放大器调零。连接主机与模块电路电源连接线，差动放大器增益置于最大位置（顺时针方向旋到底），差动放大器“+”“-”输入端对地用实验线短路。输出端接电压表 2V 档。开启主机电源，用调零电位器调整差动放大器输出电压为零，然后拔掉实验线，调零后模块上的“增益、调零”电位器均不应再变动。

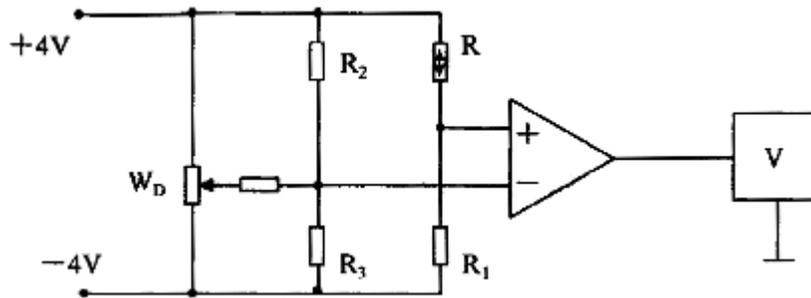


图 3.1 电桥电路

2、观察贴于悬臂梁根部的箔式应变计的位置与方向，按图（3.1）将所需实验部件连接成测试桥路，图中 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为模块上的固定标准电阻， R 为应变计（可任选上梁或下梁中的一个工作片），注意连接方式，勿使直流激励电源短路。

将螺旋测微仪装于应变悬臂梁前端永久磁钢上，并调节测微仪使悬臂梁基本处于水平位置。

3、确认接线无误后开启主机，并预热数分钟，使电路工作趋于稳定。调节模块上的 W_D 电位器，使桥路输出为零。

4、用螺旋测微仪带动悬臂梁分别向上和向下位移各 5mm，每位移 1mm 记录一个输出电压值，并记入下表：

位移 mm							0						
电压 V							0						

5、依次将图（3.1）中的固定电阻 R1，换接应变计组成半桥、将固定电阻 R2 、R3，换接应变计组成全桥。

6、重复 3-4 步骤，完成半桥与全桥测试实验。

7、用半导体应变片替换箔式应变片，重复 2-3 步骤。

8、根据表中所测数据在同一坐标上描出 V-X 曲线，计算灵敏度 S: $S = \Delta V / \Delta X$ ，比较三种桥路的灵敏度，并做出定性的结论。

9、观察改用交流激励电源时应变片的工作特性。

10、由于悬臂梁弹性恢复的滞后及应变片本身的机械滞后，所以当螺旋测微仪回到初始位置后桥路电压输出值并不能马上回到零，此时可一次或几次将螺旋测微仪反方向转动一个较大位移，使电压值回到零后再进行反向采集实验。

实验中用螺旋测微仪进行位移后应将手离开仪器后方能读取测试系统输出电压数，否则虽然没有改变刻度值也会造成微小位移或人体感应使电压信号出现偏差。应变片接入桥路时，要注意应变片的受力方向，一定要接成差动形式，即邻臂受力方向相反，对臂受力方向相同，如接反则电路无输出或输出很小。更换应变片时应将电源关闭。

六、思考题

- 1、本实验对直流稳压电源和差动放大器有何要求？
- 2、应变片桥路（差动电桥）连接应注意哪些问题？
- 3、桥路（差动电桥）测量时存在非线性误差的主要原因是什么？
- 4、箔式应变片和半导体应变片在工作原理和性能上有什么区别？
- 5、用交流和直流作为激励电源时，传感器的性能有何变化？

2. 半导体霍尔式传感器的特性 - 交直流激励、振幅测量实验

一、实验目的:

- 1、了解霍尔式传感器的原理与特性;
- 2、了解交流激励时霍尔式传感器的特性;
- 3、了解霍尔式传感器在振动测量中的应用。

二 实验原理:

霍尔元件是根据霍尔效应原理制成的磁电转换元件,当霍尔元件位于由两个环形磁钢组成的梯度磁场中时就成了霍尔位移传感器。

根据霍尔效应,霍尔电势 $U_H=K_HIB$ 。当霍尔元件通以恒定电流处在梯度磁场中运动时,就有霍尔电势输出,霍尔电势的大小正比于磁场强度(磁场位置),当所处的磁场方向改变时,霍尔电势的方向也随之改变。利用这一性质可以进行位移测量。

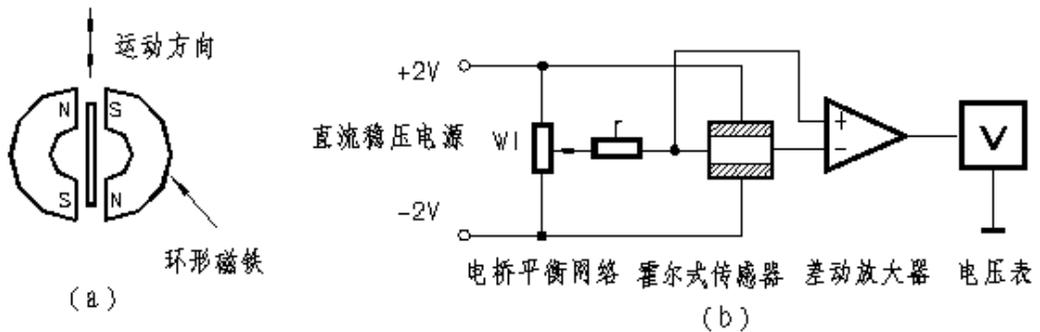


图 3.2 霍尔传感器直流激励

三、实验所需部件：

- 1.霍尔传感器、直流稳压电源（2V）
- 2.电压表、测微仪、音频信号源、螺旋测微仪
- 3.示波器、低频信号源、激振器

四、实验步骤：

（一）直流激励特性

- 1、连接主机与实验模块电源及传感器接口，确认霍尔元件直流激励电压为 2V，霍尔元件另一激励端接地，实验接线按图 3.2 所示，差动放大器增益 10 倍左右。
- 2、用螺旋测微仪调节精密位移装置使霍尔元件置于梯度磁场中间，并调节电桥直流电位器 W_D ，使输出为零。
- 4、从中点开始，调节螺旋测微仪，前后移动霍尔元件各 3.5mm(可视灵敏度自定)，每变化 0.5mm(可视灵敏度自定)读取相应的电压值，并记入下表：

Xmm								0							
V₀mv								0							

作出 V-X 曲线，求得灵敏度和线性工作范围。如出现非线性情况，请查找原因。

（二）交流激励特性

- 1、连接主机与实验模块电源线，按图（5）接好实验电路，差动放大器增益适当，音频信号输出从 180° 端口（电压输出）引出，幅度 $V_{p-p} \leq 4V$ ，示波器两个通道分别接相敏检波器①、②端。

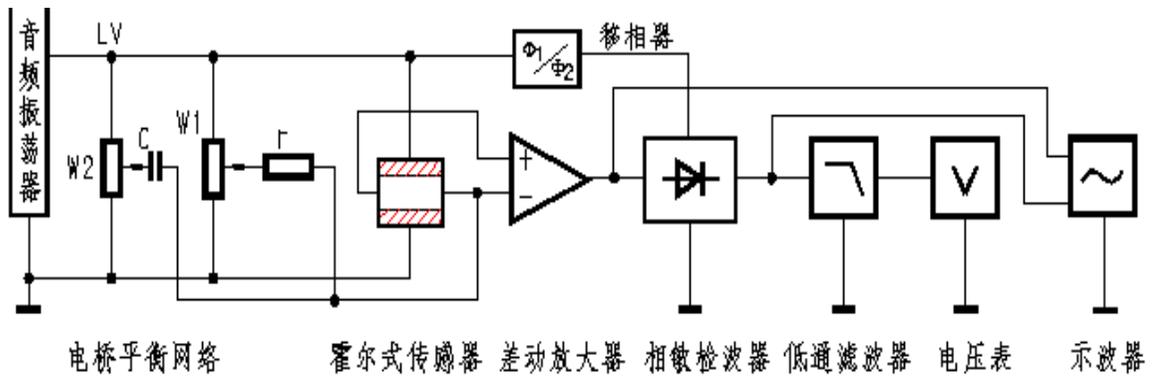


图 26

图 3.3 霍尔传感器交流激励测试框图

2、开启主机电源，按交流全桥的调节方式调节移相器及电桥，使霍尔元件位于磁场中间时输出电压为零。

3、调节测微仪，带动霍尔元件在磁场中前后各位移 3.5mm，记录电压读数并记入下表：

Xmm							0							
Vmv							0							

作出 V-X 曲线，求出灵敏度，并与直流激励测试系统进行比较。

六、思考题

- 1、什么是霍尔效应？霍尔元件常用什么材料？为什么？
- 2、本实验中霍尔元件位移的线性度实际上反映的是什么的量变化？
- 3、交直流激励时，霍尔式传感器测量位移有什么区别？
- 4、在振幅测量中，移相器、相敏检波器、低通滤波器各起什么作用？

3. 差动变压器的性能实验

一、实验目的:

- 1、了解差动变压器的基本结构及原理，验证差动变压器的基本特性；
- 2、了解差动变压器零点残余电压产生的原因及补偿方法；
- 3、了解差动变压器的实际应用。

二、实验原理:

电感传感器是一种将位置量的变化转为电感量变化的传感器，差动变压器由衔铁、初级线圈、次级线圈和线圈骨架组成，初级线圈做为差动变压器激励用，相当于变压器原边。次级线圈由两个结构尺寸和参数相同的线圈反相串接而成，相当于变压器副边。差动变压器是开磁路，工作是建立在互感基础上的，其原理及输出特性见图(3.4)。

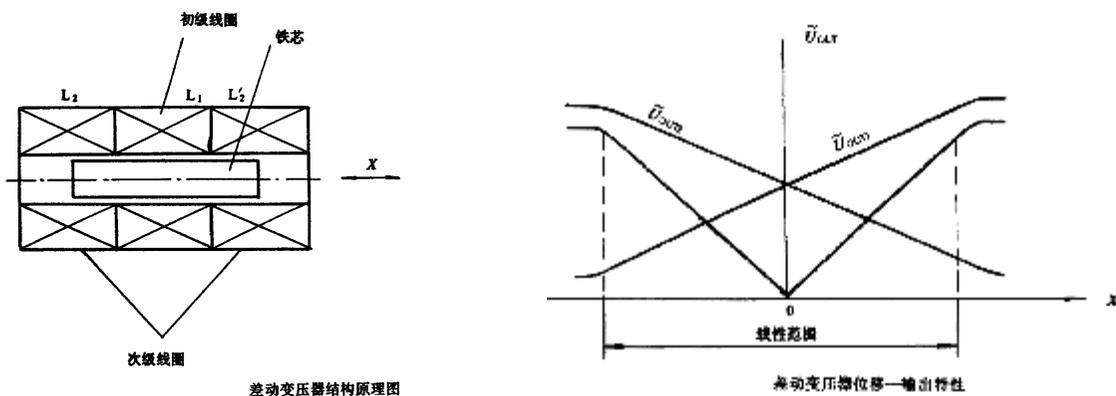


图 3.4 差动变压器 原理及输出特性见图。

由于零点残余电压的存在会造成差动变压器零点附近的不灵敏区，此电压经过放大器还会使放大器未级趋向饱和，影响电路正常工作，因此必须采用适当的方法进行补偿使之减小。

零点残余电压中主要包含两种波形成份：

a、基波分量：这是由于差动变压器二个次级绕组因材料或工艺差异造成等效电路参数（M、L、R）不同，线圈中的铜损电阻及导磁材料的铁损、线圈中线间电容的存在，都使得激励电流与所产生的磁通不同相。

b、高次谐波：主要是由导磁材料磁化曲线的非线性引起，由于磁滞损耗和铁磁饱和的影响，使激励电流与磁通波形不一致，产生了非正弦波（主要是三次谐波）磁通，从而在二次绕组中感应出非正弦波的电动势。

减少零点残余电压的办法是：（1）从设计和工艺制作上尽量保证线路和磁路的对称。（2）采用相敏检波电路。（3）选用补偿电路。

三、实验所需部件：

- 1.差动变压器电感传感器实验模块
- 2 音频信号源、螺旋测微仪、
- 3 示波器、电压/频率表、振动平台

四、实验步骤：

1、按图（3.5）接线，差动变压器初级线圈必须从音频信号源 LV 功率输出端接入，二个次级线圈串接。双线示波器第一通道灵敏度 500mv/格，第二通道 10mv/格。

2、打开主机电源，调整音频输出信号频率，输出 V_{p-p} 值 2V，以示波器第二通道观察到的波形不失真为好。

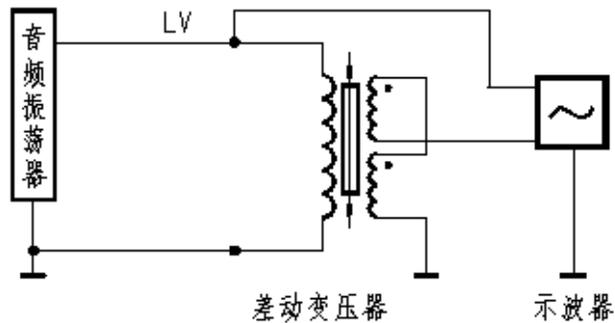


图 3.5 差动变压器次级线圈串接

3、前后移动改变变压器磁芯在线圈中位置，观察示波器第二通道所示波形能否过零翻转，否则改变接次级二个线圈的串接端序。

4、用螺旋测微仪带动铁芯在线圈中移动，从示波器中读出次级输出电压 V_{p-p} 值，同时注意初次级线圈波形相位。

位移 mm										
电压 V_{p-p}										

根据表格所列结果，作出 V-X 曲线，求出灵敏度并指出线性工作范围。

七、思考题

- 1、简述差动变压器的工作原理，并说明差动变压器与一般普通变压器有什么区别？
- 2、差动变压器零点残余电压产生是如何产生的？如何消除零点残余电压？

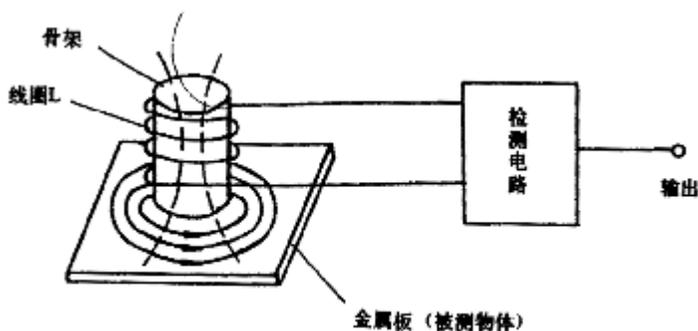
4. 电涡流式传感器的静态标定

一、实验目的：

- 1、了解电涡流式传感器的工作原理；
- 2、掌握传感器静态标定方法。

二、实验原理：

电涡流传感器由平面线圈和金属涡流片组成，如图 3.8 所示。当线圈中通以高频交变电流后，在与其平行的金属片上会感应产生电涡流，电涡流的大小影响线圈的阻抗 Z ，而涡流的大小与金属涡流片的电阻率，导磁率、厚度、温度以及与线圈的距离 X 有关，当平面线圈、被测体（涡流片）、激励源确定，并保持环境温度不变，阻抗 Z 只与距离 X 有关，将阻抗变化转为电压信号 V 输出，则输出电压是距离 X 的单值函数。



涡流式位移传感器的基本结构及工作原理图

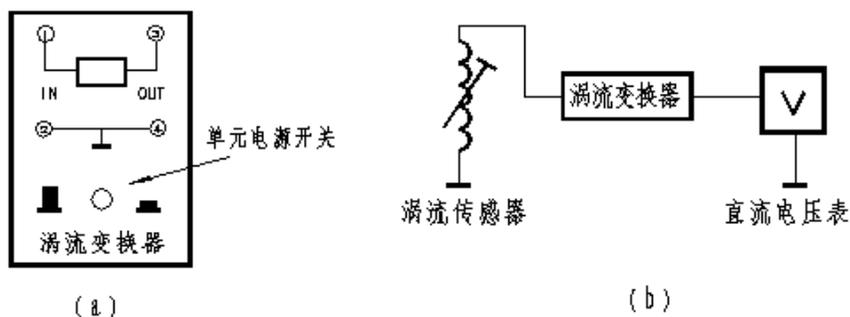


图 3.8 电涡流式传感器的工作原理

三 实验所需部件:

电涡流传感器、电涡流传感器实验模块、螺旋测微仪、电压表、示波器、多种金属涡流片

四、实验步骤:

- 1、连接电涡流传感器、电涡流变换器、电压表，电涡流线圈与涡流片须保持平行，涡流变换器输出接电压表 20V 档。
2. 开启主机电源，用测微仪带动涡流片移动，当涡流片完全紧贴线圈时输出电压为零（如不为零可适当改变支架中的线圈角度），然后旋动测微仪使涡流片离开线圈，从电压表有读数时每隔 0.2mm 记录一个电压值，将 V、X 数值填入下表，作出 V-X 曲线，指出线性范围，求出灵敏度

Xmm																				
Vmv																				

3、示波器接电涡流线圈与实验模块输入端口，观察电涡流传感器的激励信号频率，随着线圈与电涡流片距离的变化，信号幅度也发生变化，当涡流片紧贴线圈时电路停振，输出为零。

4、按实验步骤 1、2 分别对铁、铜、铝涡流片进行测试与标定，记录数据，在同一坐标上作出 V-X 曲线。

Xmm																				
铁 Vmv																				
铜 Vmv																				
铝 Vmv																				

5、分别找出不同材料被测体的线性工作范围，灵敏度，最佳工作点（双向或单向）并进行比较，并做出定性的结论。

五、注意事项：

1、模块输入端接入示波器时由于一些示波器的输入阻抗不高（包括探头阻抗）以至影响线圈的阻抗，使输出 V_0 变小，并造成初始位置附近的一段死区，示波器探头不接输入端即可解决这个问题。

2、换上铜、铝和其他金属涡流片时，线圈紧贴涡流片时输出电压并不为零，这是因为电涡流线圈的尺寸是为配合铁涡流片而设计的，换了不同材料的涡流片，线圈尺寸须改变输出才能为零。

六、思考题

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

5. 热敏电阻测温实验

一、实验目的:

- 1、了解热敏电阻测温原理及应用;
- 2、了解铂热电阻的特性及应用;
- 3、了解集成温度传感器的原理及应用。

二、实验原理:

1、热敏电阻是利用半导体的电阻值随温度升高而急剧下降这一特性制成的热敏元件。 $R_T = Ae^{B/T}$ ，它呈负温度特性，灵敏度高，可以测量小于 0.01°C 的温差变化。

2、Pt100 铂热电阻的电阻值在 0°C 时为 100Ω ，测温范围一般为 $-200\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，铂热电阻的阻值与温度的关系近似线性，当温度在 $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 650^{\circ}\text{C}$ 时，

$$R_T = R_0 (1 + A_T + BT^2)$$

式中 R_T ——铂热电阻 $T^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值

R_0 ——铂热电阻在 0°C 时的电阻值

A ——系数 ($=3.96847 \times 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$)

B ——系数 ($=-5.847 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}^2$)

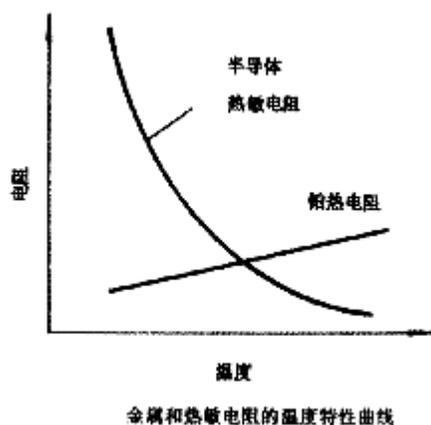


图 3.9 铂热电阻的特性

将铂热电阻作为桥路中的一部分在温度变化时电桥失衡便可测得相应电路的输出电压变化值。

3、用集成工艺制成的双端电流型温度传感器，在一定的温度范围内按 $1\mu\text{A/K}$ 的恒定比值输出与温度成正比的电流，通过对电流的测量即可得知温度值（K 氏温度），经 K 氏-摄氏转换电路直接显示 $^{\circ}\text{C}$ 温度值。

三、实验所需部件:

MF 型热敏电阻、温控电加热器、温度传感器实验模块、电压表、温度计、铂热电阻 (Pt₁₀₀)、加热炉、温控器、集成温度传感器。

四、实验步骤:

热敏电阻

1、观察已置于加热炉上的热敏电阻，温度计置于与传感器相同的感温位置。连接主机与实验模块的电源线及传感器接口线，热敏电阻测温电路输出端接数字电压表。

2、打开主机电源，调节模块上的热敏转换电路电压输出电压值，使其值尽量大但不饱和。

3、设定加热炉加热温度后开启加热电源。

4、观察随温度上升时输出电压值变化，待温度稳定后将 V-T 值记入下表。

5、作出 V-T 曲线，得出用热敏电阻测温结果的结论。

铂热电阻

1、观察已置于加热炉顶部的铂热电阻，连接主机与实验模块的电源线及传感器与模块处理电路接口，铂热电阻电路输出端 V_O 接电压表，温度计置于热电阻旁感受相同的温度。

2、开启主机电源，调节铂热电阻电路调零旋钮，使输出电压为零，电路增益适中，由于铂电阻通过电流时产生自热其电阻值要发生变化，因此电路有一个稳定过程。

3、开启加热炉，设定加热炉温度为 $\leq 100^{\circ}\text{C}$ ，观察随炉温上升铂电阻的阻值变化及输出电压变化，（实验时主机温度表上显示的温度值是加热炉的炉内温度，并非是加热炉顶端传感器感受到的温度）。并记录数据填入下表。

4、做出 V-T 曲线，观察其工作线性范围。

集成温度传感器

1、观察置于加热炉上的集成温度传感器，温度计置于传感器同一感温处。连接主机与实验模块电源，按图标对应连接传感器接口与处理电路输入端，输出端接电压表。

2、打开主机电源，根据温度计示值调节转换电路电位器，使电压表（2V 档）所示当前温度值（已设定电压显示值最后一位为 1/10℃值，如电压表 2V 档显示 0.256 就表示 25.6℃）。

3、开启加热开关，设定加热器温度，观察随温度上升，电路输出的电压值，记录数据填入下表，并与温度计显示值比较，得出定性结论。

℃	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
热敏电阻 V_T															
铂热电阻 V_T															
集成 温度	V_T														
	℃ V_T														

五、注意事项：

1、加热炉温度请勿超过 200℃，以免损坏传感器的包装。当加热开始，热电偶一定要插入炉内，否则炉温会失控，同样做温度实验时需用热电偶来控制加热炉温度。

2、热敏电阻感受到的温度与温度计上的温度相同，并不是加热炉数字表上显示的温度。而且热敏电阻的阻值随温度不同变化较大，故应在温度稳定后记录数据。

3、因为热敏电阻负温度特性呈非线性，所以实验时建议多采几个点。

六、思考题

- 1、简述热敏电阻测温的工作原理。
- 2、试比较实验中三种温度传感器的性能。

6. 差动变面积式电容传感器特性

一 实验目的:

了解差动变面积式电容传感器的原理及特性。

二: 实验原理

差动式平行变面积电容的两组电容片 C_{x1} C_{x2} 作为双 T 电桥的两臂,当电容量发生变化时,桥路输出电压发生变化.

三 实验部件

电容传感器、差动放大器、低通滤波器、V/F 表、激振器、示波器。

四 实验步骤:

1、差动放大器调零, 按图 3.10 接线。

2、差动放大器增益旋钮置中间, V/F 表打到 2V, 调节测微头, 使输出为零。

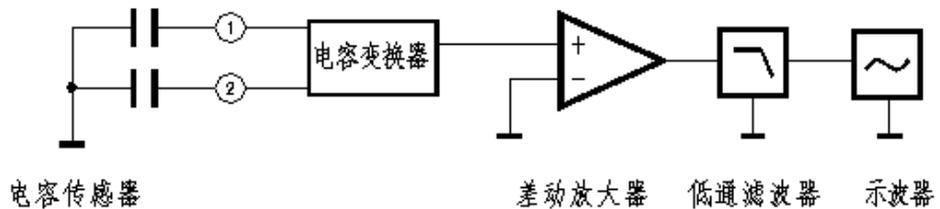


图. 3.10 差动变面积式电容传感器实验框图

3、旋动测微头, 每次 0.5mm, 记下此时测微头的读数及电压表的读数, 直至电容动片与上(或下)静片覆盖面积最大为止。

X(mm)								
V(mV)								

退回测微头至初始位置。并开始以相反方向旋动。同上法, 记下 X(mm)及 V(mV)值。

4、计算系统灵敏度 $S = \frac{\Delta V}{\Delta X}$ 并作出 V-X 曲线。

X(mm)									
V(mV)									

5、断开测微头，断开电压表，接通激振器，用示波器观察输出波形。

7 压电加速度传感器特性及应用

一 实验目的:

了解压电加速度传感器的原理、结构及应用。

二 实验原理

压电加速度计是一种以具有压电特性材料为敏感元件的机电转换装置.它可以把振动物体的机械能转变为电能,当加速度计感受到振动信号时,其输出端产生一个与振动加速度成正比的电荷量.

三 实验部件:

低频振荡器、电压放大器、低通滤波器、涡流传感器、涡流变换器、单芯屏蔽线、加速度计、双线示波器

四 实验步骤:

1、观察装于双平行梁上的压电加速度计的结构,它主要由压电陶瓷片及惯性质量块组成。

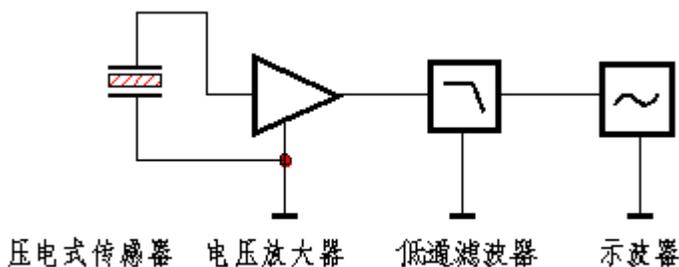


图 3.11 压电加速度传感器接线图

- 2、将压电加速度计的输出生屏蔽线引到电压放大器的输入端,然后将电压放大器输出接到低通滤波器的输入端。
- 3、接通激振器。
- 4、开启电源,适当调节低频振荡器的幅度,不宜过大。
- 5、用示波器的两个通道同时观察电压放大器与低通滤波器的输出波形。
- 6、改变频率,观察输出波形的变化。
- 7、用手轻击试验台,观察输出波形的变化。可见敲击时输出波形会产生“毛刺”,试解释原因。

问题:

为什么电荷放大器与压电加速度计的接线必须用屏蔽线，否则会产生什么问题？

注意:

(1) 双平行梁振动时应无碰撞现象，否则将严重影响输出波形。必要时可松开梁的固定端，小心调整一个位置。

(2) 低频振荡器的幅度应适当，避免失真。

(3) 屏蔽线的屏蔽层应接地。

(4) 由于压电式传感器制作困难，动态范围可能与电涡流式传感器不统一，可由其它传感器如电容式传感器来观察相位差。电容式传感器的输出波形不经过低通虽然不太光滑，但不影响观察效果。

8. 磁电式传感器特性

一 实验目的:

了解磁电式传感器的原理及性能。

二 实验原理

磁电式传感器是一种能将非电量变化转化为感应电动势的传感器, 所以也称感应传感器式

三 实验部件:

差动放大器、涡流变换器、激振器、示波器。

四 实验步骤

1. 有关旋钮的初始位置: 差动放大器增益旋钮置于中间, 按下低频振荡器的振动控制开关, 低频振荡器的幅度旋钮置于最小, V/F 表置 F 表 2KHz 档。
2. 实验过程中, 低频振荡器的调幅旋钮不能过大, 以梁振动时不碰撞其他为佳。
3. 观察磁电式传感器的结构, 根据图 21 的电路结构, 将磁电式传感器, 差动放大器, 低通滤波器, 双线示波器连接起来, 组成一个测量线路, 并将低频振荡器的输出端与频率表的输入端相连。
4. 调整好示波器, 低频振荡器的幅度旋钮固定至某一位置, 调节频率, 调节时用频率表监测频率, 用示波器读出峰峰值填入下表。

F(Hz)	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30
V(p-p)										

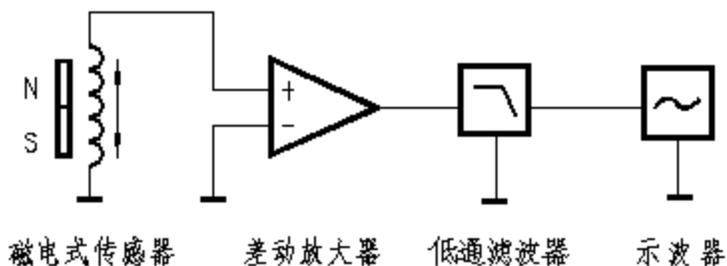


图 3.12 磁电式传感器实验接线图

9. 光纤传感器测量位移

一. 实验目的

- 1.了解光纤传感器的原理、结构.
- 2.掌握光纤传感器在振动、位移、转速测量中的应用.

二、光纤传感器的基本原理

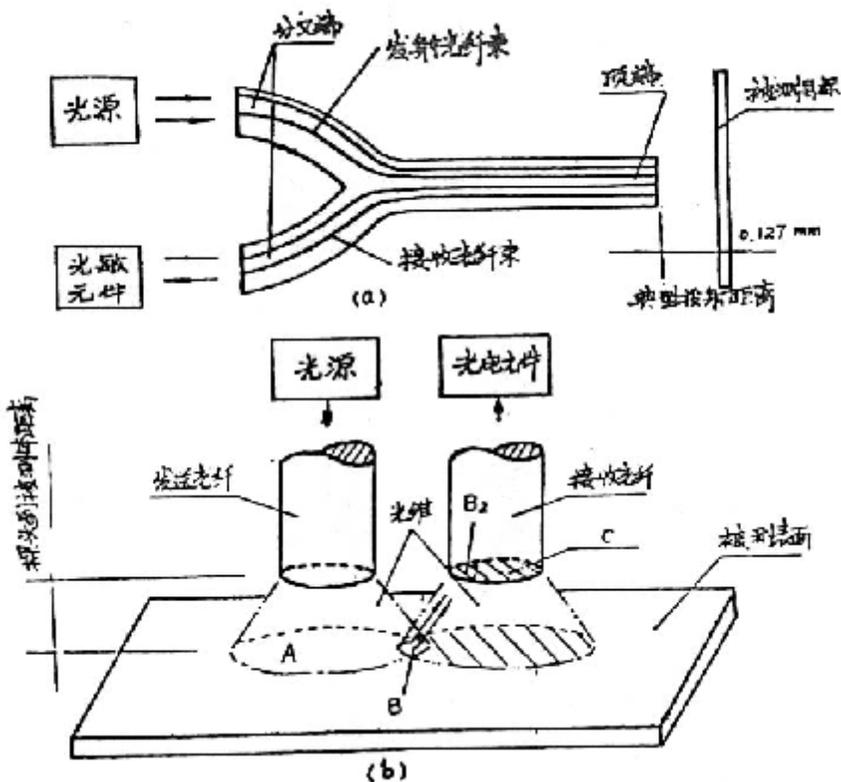
光纤传感器的基本原理是将光源的光经光纤送入调制区,在调制区内,外界被测参数与进入调制区的光相互作用,使光的光学性质如光的温度,波长(颜色)频率,相位,偏振态,发生成为被调制的信号光,再经光纤送入光探测器,经解调而获得被测参数。

在传感型光纤传感器中,是利用对外界信息具有敏感能力和检测能力的光纤作为传感元件.光纤不仅起传光作用,而且利用光纤在外界信息作用下,光学特性(如光强,相位,偏振态等)的变化来实现传感功能。目前已实用的光纤传感器中,传光型占大多数。

光纤传感器可以用于高压、电气、噪音、高温、腐蚀或其他恶劣环境,而且具有与光纤遥测技术的内在相容性。目前,正在研制中的光纤传感器有磁、声、压力、温度、加速度、陀螺、位移、液面、转矩、光声、电流和压变等类型的光纤传感器。

位移是一种常量,它是线位移和角位移的总称。位移测量在工程中得到广泛应用。且其他物理量和机械量都可以通过某些弹性元件和传动机构,转换成位移而测得。

位移的含义是表示物体上某点在某一确定方向上的位置变动。因而它是一个有大小和方向的矢量。在光纤位移传感器中,主要可分为强度型和干涉型两大类。本实验中采用的是传光型反射式光纤位移传感器,属于强度型。光纤位移传感器是利用光导纤维传输光信号的功能,根据探测到的反射光的强度来测量被测反射表面的距离,光纤位移传感器原理示意图,如图 3.13



所示

光纤传感器的主要特点有：

- 1、光纤是一种很灵敏的检测元件，其灵敏度，线性，动态范围均不亚于常规传感器。
- 2、光纤传感器外径很小，因此有利于用在狭小空间环境下的测量。正是由于体积小重量轻，因此便于在飞行器内使用。
- 3、光导纤维传感器具有耐高温性，因此可用于高温下测量；又具有耐水性，因此可用于水中测量。
- 4、光导纤维传感器具有可挠性，因此可在振动情况下测量。
- 5、光导纤维传感器频带很宽，有利于超高速测量。

标准的光纤位移传感器中，由 600 根光导纤维组成一个直径为 0.762mm 的光缆，光纤内芯是折射率为 1.62 的火石玻璃，包层用折射率为 1.52 的玻璃，光缆的后部被分为两支，一支用于光发射，一支用于光接收。光源是 2.5V 白炽灯泡，而接收光信号的敏感元件是光电池，光敏检测器产生与接收到的光强成正比的电信号。对于每 0.25 μm 的位移产生 1V 的电压输出，分辨率是 0.025 μm ，它的工作原理是：当光纤探头端部紧贴被测件时，发射光纤中的光不能反射到接收光纤中去，因而就不能产生光电流信号，当被测表面渐渐远离光纤探头时发射光纤照亮被测表面的面积 A 越来越大，因而相应的发射光锥和接收光锥重合的面积 B1 越来越大，接收光纤端面上被照亮的 B2 区也越来越小，有一线性增长的输出信号就达到了位移—输出信号曲线上的“光峰点”，光峰点以前的这段曲线叫前坡区；当被测表面继续远离时，由于被反射光照亮的 B2 面积大于 c，即有部分反射光没有反射进接收光纤，当接收光纤更加远离被测表面，接收到的光强逐减小，光敏检测器的输出信号逐渐减弱，便进入曲线的后坡区。

位移—输出电压特性见图 3.14 所示。

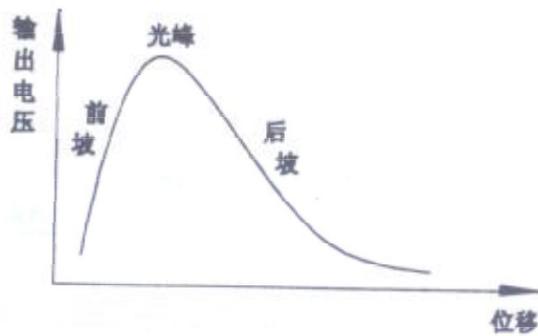


图 3.14 位移—输出电压特性曲线

在后坡区，信号的减弱与探头和被测表面之间的距离平方成反比。在前坡区，输出信号的强度增加得非常快，所以这一区域可以用来进行微米级的位移测量。后坡区域可用于距离较远而灵敏度，线性度和精度要求不高的测量。而在所谓的光峰区域，输出信号对于光强度变化的灵敏度要比对于位移变化的灵敏度大得多，所以这个区域可用于对表面状态进行光学测量。

这种类型的光纤传感器灵敏度与所使用的光纤束特性有关，这些特性包括光导纤维的数量、光导纤维的尺寸和分布，以及每一根纤维的数值孔径等。其中，在光纤探头端部，发射光纤和接收光纤的分布状况是决定探头的测量范围和灵敏度的主要因素，例如，将接收光纤和发射光纤一个交错排列，可以获得最大位移灵敏度。但是这样排列困难，化费也贵，若控制好光导纤维，随机排列理想，也可近似地达到灵敏度的最佳值。

三、实验部件

本实验用测量方框图如图 3.15 所示

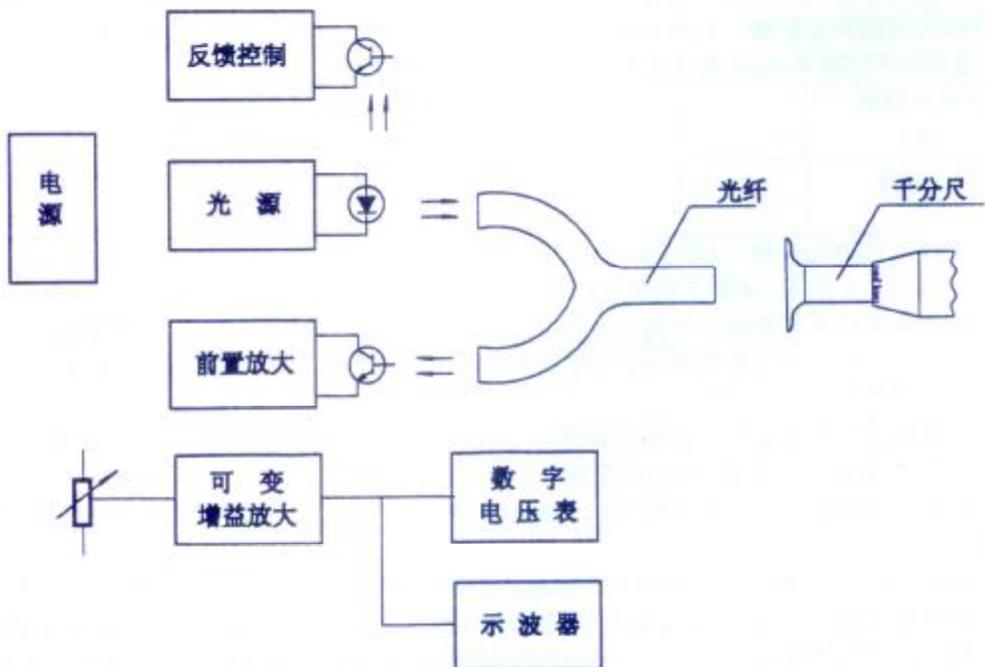


图 3.15 位移测量框图

主要部件有：1.位移测量架（含螺旋千分卡，反射镜）；

2.Y 型光纤束及探头、光电转换耦合器；

3.光纤变换器；

4.v / F 表；

5.外配可监测波形的示波器(选用)；

四、实验步骤

1. 检查光纤位移传感器安装情况，将光纤探头插入位移架左侧探头位，并用螺丝固定。

转动千分卡手把，将反射镜移向右侧

2. 开启光纤变换器电源。

3. 将显示表测量转换开关置于电压测量档，检查显示情况是否正常，将输入短路，是显示零电压，然后将输入和光纤变换器输出相连接。

4. 用擦镜纸，轻擦光纤探头端面 and 反射镜，除去灰尘且小留纸屑，盖上遮光罩，可以开始测量位移—输出特性。

5. 左右来回缓慢移动反射镜，在距光纤探头 0.5~1.0mm 范围内，寻找输出峰值，（即光峰点）调节放大器增益，使峰值定为 10.00V(归一化操作)。此步骤需来回几次细心调整，待读数稳定后，方可进行下一步。

6. 转动千分尺卡手把、使反射镜轻微接近光纤探头，小心不要过分按压，以免损坏光纤探头端面 and 反射镜，此时传感器输出接近为零，千分卡上读数是位移量。然后每隔 0.01mm 读出电压表读，填入下表

千分卡读数 (X)							
输出电压							

从零直到 3mm 处（即千分卡总行程不小于 3mm）

4. 作出 V—X 曲线，计算灵敏度及线性度。
5. 为观察外界光影响，可除去遮光罩以及改变环境光照情况下重复上述实验。
6. 有条件时，改变使用不同的分布光纤探头，诸如园、同心、随机等、重复上述实

验。

7. 需做重复性测量时，需要重新进行实验步骤(1)，作峰值寻找及归一化调整到 10. OOV 以克服系统的漂移，使测量重复性良好。

8. 实验结束后，一切恢复原状，保护好光纤探头和反射镜，并关掉光纤变换器的电源。

实验注意：1. 光纤输出端不允许接地，否则损坏内部元件；2. 表头输入端的负端，内部已接地；3. 由于前置放大，增益较大和内部热噪电压，显示在 0.05 左右跳动属正常：

4. 为了保护反光镜片，不允许光纤探头与之接触相碰（机构中的保护档块不允许去除）。

六、思考题

1. 光纤位移传感器的工作原理及其优越性？
2. 有哪些因素会影响输出特性曲线的形状、线性范围等？
8. 影响测量稳定性有哪些因素？
4. 如何克服环境光影响？
5. 你能构思一台光纤表面光洁度测量仪吗？

实验四 周期信号的谐波分析实验

前 言

周期信号的分析在科学研究和工程技术中一直是最重要和最基本的任务之一。对非电信号，一般总是将其转变为电信号进行测量和分析，所以，对电信号波形分析尤为重要，傅立叶分析是一种最常用的分析电信号波形的方法，本实验仪器主要考虑对周期信号的分解与合成。

任何一个周期信号均可用傅立叶级数来表示，傅立叶级数的各项代表了不同频率的正弦或余弦信号，即任何波形的周期信号都可以看作是这些信号（谐波）的叠加。利用不同的方法，可以从周期信号中分解出它的各次谐波的幅值和相位，也可依据信号的傅立叶级数表达式的要求叠加得到所期望的信号，用这种方法对信号进行分析，称为傅立叶分析。

了解常用周期信号的傅立叶级数表示，掌握用串联谐振电路（或带通滤波器）选频的方法，学习用加法器实现各种频率周期信号的叠加来表示一个非正弦周期信号，是周期电信号傅立叶分析的基本要求。

由于该课程核心的基本概念、基本理论和分析方法都非常重要，而且系统性、理论性很强，为此，在学本内容时，开设必要的实验，对学生加深理解、深入掌握基本理论和分析方法，培养学生分析问题和解决问题的能力，以及使抽象的概念和理论形象化、具体化，对增强学习的兴趣有极大的好处，做好本课程的实验，是学好本课程的重要教学辅助环节。

在做完每个实验后，请务必写出详细的实验报告，包括实验方法，实验过程与实验结果等。

1. BPF 带通滤波器幅频特性的研究

一、实验目的：

了解带通滤波器的工作原理和幅频特性。

二、实验器件与单元：

BPF 带通滤波器幅频特性测试模块，函数信号发生器模块，交流数字电压表模块，频率计，双踪示波器。

三、基本原理：

1、图 4.1 所示的带通滤波电路为二阶压控电压源带通滤波电路，

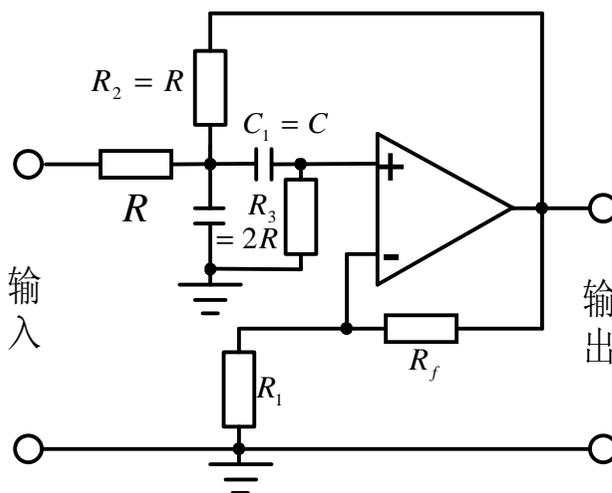


图 4.1 二阶压控电压源带通滤波电路

图中 C 、 R 组成低通网络， C_1 、 R_3 组成高通网络，两者串联就组成了带通滤波电路。为了计算方便，设 $R_2 = R$ 、 $R_3 = 2R$ ，则由 KCL 列出方程，可导出带通滤波电路的传递函数为

$$A(s) = \frac{A_{VF} sCR}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2} \quad (1)$$

式中， $A_{VF} = 1 + R_f / R_1$ 为同相比例放大器的电压增益，同样要求 $A_{VF} < 3$ 电路才能稳定地工作，令

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{A_{VF}}{3 - A_{VF}} \\ \omega_0 &= 1/(RC) \\ Q &= 1/(3 - A_{VF}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$A(s) = \frac{A_0 \frac{s}{Q\omega_0}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2} \quad (3)$$

由式 (3) 为二阶带通滤波电路传递函数的典型表达式, 其中 $\omega_0 = 1/(RC)$, 即是特征角频率, 也是带通滤波电路的中心角频率。

令 $s = j\omega$ 代入式 (1), 则有

$$A(j\omega) = \frac{A_0 \frac{1}{Q} \cdot \frac{j\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \frac{\omega}{\omega_0 Q}} = \frac{A_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad (4)$$

式 (4) 表明, 当 $\omega = \omega_0$ 时, 图 1-1 所示电路具有最大电压增益, 且 $|A(j\omega_0)| = A_0 = A_{VF}/(3 - A_{VF})$ 这就是带通滤波电路的带通电压增益。根据式 (4), 不难求出其幅频响应, 如图 4.2 所示, 由图可见, Q 值越高, 带通越窄。

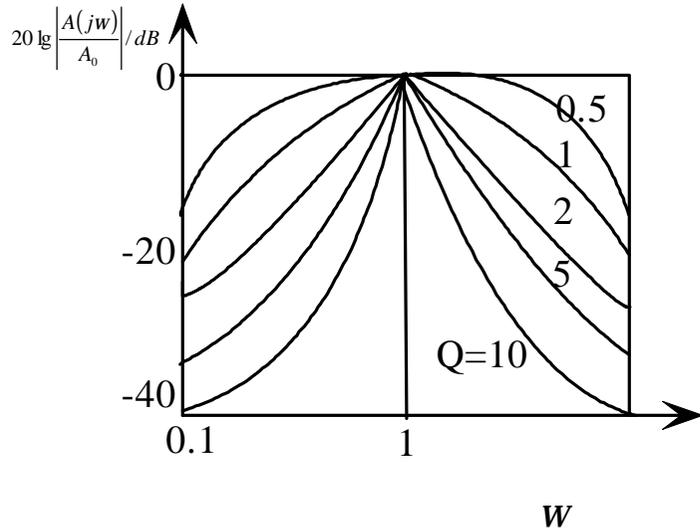


图 4.2 带通滤波器的幅频响应

当式 (4) 分母虚部的绝对值为 1 时, 有 $|A(jw)| = A_0/\sqrt{2}$; 因此, 利用 $\left|Q\left(\frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w}\right)\right| = 1$, 取正根, 可求出带通滤波电路的两个截止频率, 从而导出带通滤波电路的通带宽度 $BW = w_0/(2pQ) = f_0/Q$ 。

2、图 4.3 所示是由文氏电桥选频网络组成的另一电路结构的带通滤波器。其谐振频率为 $f = \frac{1}{2pRC}$ 。

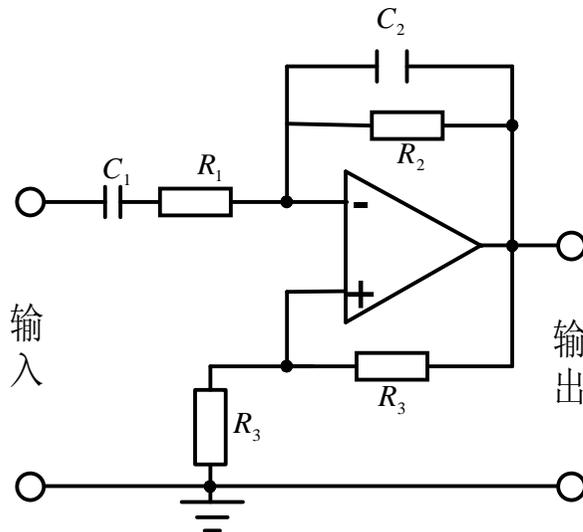


图 4.3 文氏桥有源带通滤波电路

四、实验步骤

(1) 将函数信号发生器正弦波输出接滤波器的输入端，滤波器的输出端接示波器或交流数字电压表。

(2) 分别用图 1—1 和图 1—3 所示电路，测试 BPF 带通滤波器的幅频特性。实验时必须在保持正弦波信号输入电压 (U_i) 幅值不变的情况下，逐渐改变其频率，用实验箱提供的真有效值交流数字电压表测量 RC 滤波器输出端电压 U_o 的电压值，并把所测的数据记录在表一。注意每当改变信号源频率时，都必须观察一下输入信号 U_i 使之保持不变。实验时应接入双踪示波器，分别观测输入 U_i 和 U_o 的波形（注意：在整个实验过程中应保持 U_i 恒定不变）。

表一：

F (Hz)						$\omega_0=1/RC$ (rad/s)	$F_0=\omega_0/2\pi$ (Hz)
$U_i(V)$							
$U_o(V)$							

五、思考题：

滤波器参数的改变，对滤波器特性有何影响。

六、实验报告要求：

- 1、根据实验测量所得的数据，绘制出滤波器的幅频特性。计算出特征频率、截止频率和通频带。
- 2、分析影响带通滤波器的带宽和选择性的因素有哪些。

2. 周期电信号的分解与合成

一、实验目的：

- 1、了解常用周期信号的傅里叶级数表示，掌握用串联谐振电路和带通滤波器选频电路组成的滤波电路，以构筑周期电信号谐波的分解电路。
- 2、学习用加法器实现对各次谐波信号的叠加。

二、实验器件与单元：

- 1、电信号的分解与合成模块。
- 2、双踪示波器。

三、实验原理：

1、周期信号傅里叶分析的数学基础：

任意一个满足狄利克雷条件的周期为 T 的函数 $f(t)$ 都可以表示为傅里叶级数：

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

$$a_0 = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(\omega_0 t) d(\omega_0 t)$$

$$a_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(\omega_0 t) \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t)$$

$$b_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(\omega_0 t) \sin(n\omega_0 t) d(\omega_0 t)$$

例如：

a)、方波

$$u(t) = \frac{4u_m}{p} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \mathbf{L} \right) \quad (1)$$

b)、三角波

$$u(t) = \frac{8U_m}{p^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t + \mathbf{L} \right) \quad (2)$$

c)、半波

$$u(t) = \frac{2U_m}{p} \left(\frac{1}{2} + \frac{p}{4} \sin \omega t - \frac{1}{3} \cos \omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \mathbf{L} \right) \quad (3)$$

d)、全波

$$u(t) = \frac{4U_m}{p} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t - \frac{1}{35} \cos 6\omega t + \mathbf{L} \right) \quad (4)$$

e)、矩形波

$$u(t) = \frac{tU_m}{T} + \frac{2U_m}{p} \left(\sin \frac{tp}{T} \cos \omega t + \frac{1}{2} \sin \frac{2tp}{T} \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3tp}{T} \cos 3\omega t + \mathbf{L} \right) \quad (5)$$

其中 ω_0 为角频率，称为基频， $a_0/2$ 为常数（相当于信号的直流分量） a_n 和 b_n 称为第 n 次谐波的幅值，任何周期性非简谐交变信号均可用上述傅里叶级数进行展开，即分解为一系列不同次谐波的叠加。由以上各式可知，任何周期信号都可以表示为无限多次谐波的叠加，谐波次数越高，振幅越小，它对叠加的贡献就越小，当小至一定程度时（如谐波振幅小于基波振幅的 5%），则高次的谐波就可以忽略而变成有限次数谐波的叠加。

2、用带通滤波器选频电路对周期信号进行傅立叶分解

由式（1）和式（2）可知，方波和三角波都只包含奇次谐波（ $n=1,3,5,\mathbf{L}$ ）成分，因此可用相同的选频电路来对具有相同周期的这两种波进行谐波分解。从应用的角度看，由于 RLC 谐振电路中的电感 L 不容易得到准确值，也不容易小型化，现已广泛使用由运算放大器和阻容元件组成的高通、低通、带通及带阻等各种类型的滤波器，图 4.4 是就带通滤波器中的一种电路，此滤波器通带的中心频率为：

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (6)$$

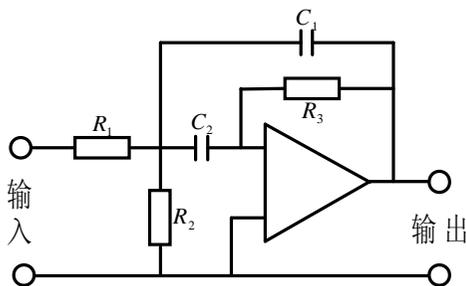


图 4.4 带通滤波器

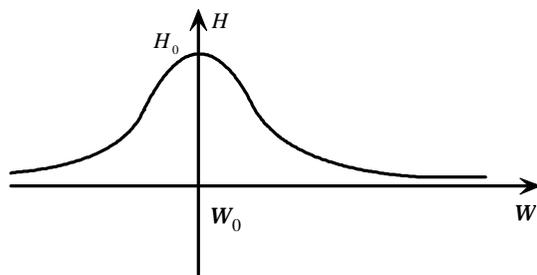


图 4.5 幅频特性

当 $C_1 = C_2 = C, R_1 = R_2 = R$ 时，由

$w_0 = \sqrt{\frac{2}{RR_3C^2}}$ 该电路还有放大作用，它的放大倍数（谐振频率时）为

$$A_0 = \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right)} = \frac{R_3}{2R} \quad (7)$$

图 4.5 是此种滤波器的频谱特性，只有频率为 w_0 时，滤波器输出为最大（谐振时）。改变 R 和 C 即可改变滤波器的中心频率，比改变 L 和 C 要方便得多。

3、谐波的合成

与上述情况相反，若要合成一个方波（或三角波）电信号，同样可以用电路来实现。由式（1）或（2）可知，需要符合如下条件的一组正弦信号的电源：（a）它们的频率之比为 $1:3:5:\dots$ （b）它们的初位相彼此相等（可以用 RC 移相器，根据 $\tan j = 1/wRC$ 来改变这些正弦信号的初位相）；（c）诸正弦信号的电压幅值之比满足要求（方波时为 $1:\frac{1}{3}:\frac{1}{5}:\dots$ 三角波时为 $1:\frac{1}{3^2}:\frac{1}{5^2}:\dots$ ）图 4.6 是这种电路的结构示意图（基频为 50Hz），图中 LPF 为低通滤波器，可分解出非正弦周期函数的直流分量。 $BPF_1 \sim BPF_6$ 为调谐在基波和各次谐波上的有源带通滤波器，加法器用于信号的合成。

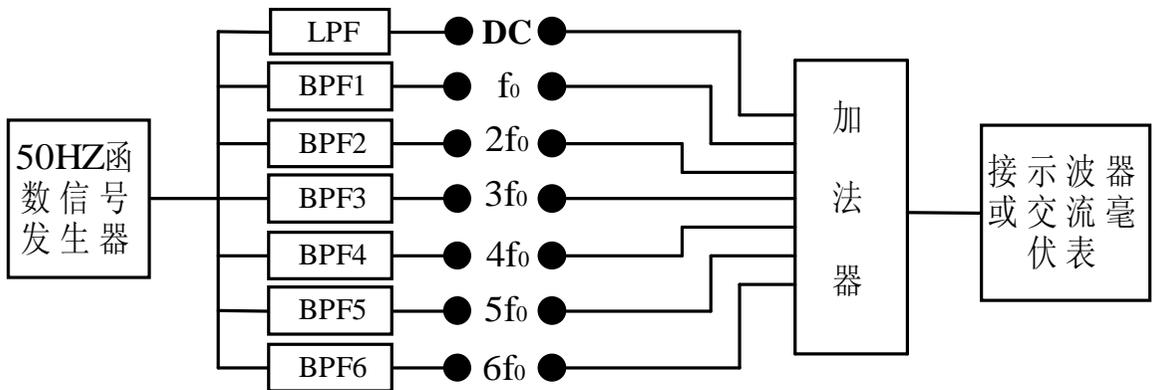


图 4.6 信号分解与合成实验装置结构框图

四. 实验内容及步骤:

(1)、分别将 50Hz 单相正弦半波、全波、方波、矩形波或三角波的输出信号接至 50Hz 电信号分解与合成模块的输入端。

(2)、将各带通滤波器的输出分别接至示波器，观测各次谐波的频率和幅值，并列表记录之。

(3)、将 50Hz 单相正弦半波、全波、矩形波、三角波的基波和小于五次的谐波分量分别接至加法器相应的输入端，观测加法器的输出波形，并记录之。

(4)、在步骤(3)的基础上，再将五次谐波分量加到加法器的输入端，观测相加后的波形，记录之。

五、思考题:

什么样的周期性函数没有直流分量和余弦项。

六、实验报告要求:

1、根据实验测量所得的数据，在同一坐标纸上绘制方波及其分解后所得的基波和各次谐波的波形，画出其频谱图。

2、将所得的基波和三次谐波及其合成波形一同绘制在同一坐标纸上。

3、将所得的基波、三次谐波、五次谐波及三者合成的波形一同绘制在同一坐标纸上，和上面的合成波形进行比较。

4、分析理论合成的波形与实验观测到的合成波形之间误差产生的原因。

3. 非正弦周期信号的傅立叶级数合成

一、实验目的：

- 1、熟悉方波和三角波等非正弦周期信号的傅立叶展开式。
- 2、掌握用谐波电源获取一个非正弦周期信号的方法。

二、实验器件与单元：

谐波电源模块，双踪示波器

三、基本原理：

方波和三角波的傅立叶展开式为：

a)、方波

$$u(t) = \frac{4u_m}{p} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \mathbf{L} \right) \quad (1)$$

b)、三角波

$$u(t) = \frac{8U_m}{p^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t + \mathbf{L} \right) \quad (2)$$

由以上表达式可知，要合成方波和三角波，只要使各正弦波的幅度和频率的比值满足傅立叶展开式，然后通过加法器把各正弦波相加即可。其中，负的谐波项只需把相应的正弦波打到反相即可。

四、实验步骤：

1、方波的合成：

(1)、选择实验仪谐波电源部分，基波的频率固定为 50Hz，二次、三次、四次、五次谐波电源的频率分别固定为：100Hz、150Hz、200Hz、250Hz，幅度可调。2~5 次谐波电源可取反相输出。

(2)、调节谐波幅度，把谐波选择开关分别拨到 f_1 , f_2 L 档，调节相应的谐波输出电压调节电位器 f_1 , f_2 L，使 50Hz、150Hz、250Hz 的正弦信号的输出幅度比满足 $1:\frac{1}{3}:\frac{1}{5}$ ，100Hz、200Hz 的输出调节为零，2~5 次谐波电源输出与基波同相位（即相位切换开关打在下面）。

(3)、依次将各次谐波的输出接到加法器的输入端进行叠加，观察合成的波形，画出此合成的波形。

2、三角波的合成：

(4)、按上述实验步骤 (1)、(2) 调节基波、三次谐波、五次谐波电源的输出，使其幅度之比满足 $1:\frac{1}{3^2}:\frac{1}{5^2}$ 。并且取三次谐波反相输出。（注意：相位切换开关打在上面为反相，打在下面为同相。）

(5)、依次将各次谐波接到加法器的三个输入端进行叠加，观察合成的波形，并画出此合成的波形。

(6) 根据不同波形的傅里叶级数表达式，调节各谐波电源和倒相开关获取所需信号波形。（选做，实验步骤自拟）

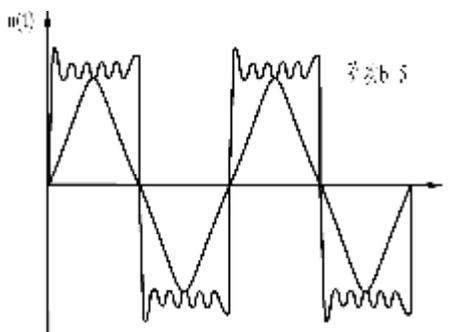


图 4.7 方波和三角波的傅里叶合成

五、思考题：

- 1、此模块只能进行哪些周期信号的合成，为什么？
- 2、各次谐波输出幅度的改变，对合成信号有何影响？
- 3、各次谐波相位的改变，对合成信号有何影响？

六、实验报告要求：

将实验观察到的波形画到方格纸上，试与理论波形作比较，分析合成的波形与实际的波形相比会有哪些失真，试述减小失真的途径。

4. RLC 串联谐振电路选频特性与信号的分解

一、实验目的：

- 1、进一步掌握信号分解的方法。
- 2、熟悉 RLC 串联谐振电路的选频特性。

二、实验器件与单元：

周期信号的分解模块，双踪示波器，函数信号发生器，频率计。

三、基本原理：

1、信号分解的基本电路：

如图 4.8 所示，选定某一频率非正弦周期信号(如方波信号)加到电路的输入端。而 RLC 的串联谐振电路的谐振频率由下式决定：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

一般而言，改变电感 L 的大小较困难（成本也较高），可通过改变电容 C 的大小来改变谐振频率， $n=1,2,3,4,5,6,7$ 时，将电容选为 C/n^2 ，即可得到 n 次谐波得谐振频率为 $n\omega_0$ ，此时各支路的电阻的输出电压最大。即可绘出该非正弦周期信号分解后的频谱图。

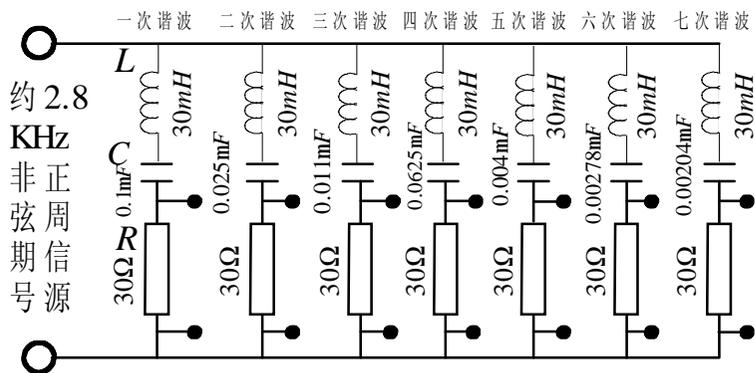


图 4.8 串联谐振选频电路

2、用李萨如图形来观测各次谐波相位关系的基本电路：

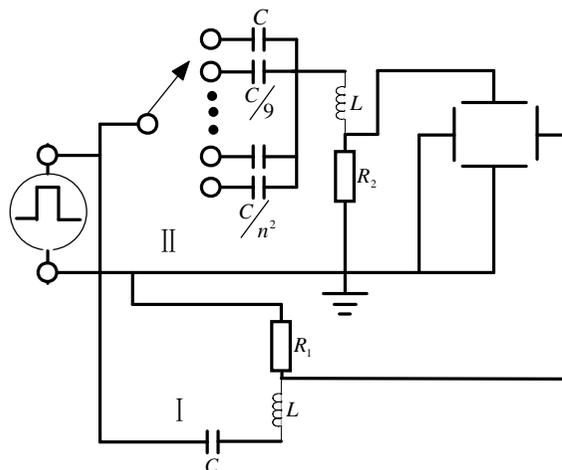


图 4.9 李萨如图形法

如图 4.9 串联电路 I 用来选择基频，串联电路 II 用来选择各次谐波，当电路 II 对第 n 次谐波产生谐振时，电阻 R_1 两端的电压为：

$$u_{R_1} = I_0 R_1 \sin(n\omega_0 t + j_n) \quad (4)$$

式中 $j_n = \arctan(X_n / R_1)$ ， X_n 为 RLC 串联电路的感抗 ($Z_L = jn\omega_0 L$) 和容抗 ($Z_C = 1 / jn\omega_0 C$) 的代数和，谐振时， $X_n = 0, I_0 = b_n / Z = b_n / R_1, Z$ 为串联电路的总阻抗， b_n 为 n 次谐波的电压幅值，此时 $Z = R_1$ ，在实际测量中，信号发生器内阻 R_i 和电感的损耗电阻 R_L 不可忽略，应该用 $R = R_1 + R_i + R_L$ 来代替 R_1 ，特别要指出，由于趋肤效应的影响， R_L 将随频率的上升而增加，即对不同次谐波， $n\omega_0$ 是不同的，在测量基波 ω_0 及各次谐波 $n\omega_0$ 时必须注意这一点。

四、实验步骤：

(1)、选择函数信号发生器为方波输出(本实验建议为 2.8KHz 左右)，并将其接至

图 4.8 所示的周期信号分解的输入端，然后细调函数信号发生器的输出频率，使 RLC 串联选频器工作在谐振状态即基波输出幅度最大。

(2)、用示波器的探头分接至各 RLC 串联选频器的输出端，观测各次谐波的频率和幅值是否与傅里叶级数相符合，即 1、3、5、7 次谐波的频率之比为 1:3:5:7，电压幅值之比为 $1:\frac{1}{3}:\frac{1}{5}:\frac{1}{7}$ ，2、4、6 次谐波的幅度为 0。

(3)、按图 4.9 接线，用李萨如图形法测量方波经不同 RLC 谐振电路选频后的相位。

(4)、将函数信号发生器改为三角波输出，实验步骤同 (1) (2) (3)，研究三角波经 RLC 串联谐振选频网络的傅里叶级数的分解。

(5)、测量不同阶次谐波时电感的损耗电阻。

选择谐振电路中频率为 f_0 、 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、 L ，用示波器（或高内阻交流电压表）分别测量如图 4.10 所示的电路在不同谐振频率下，信号发生器的输出电压 u_{AB} 和 R_1 两端的电压 u_{R_1} （设电容损耗电阻 R_C 可忽略）。由于在谐振时感抗和容抗的代数和为零，故

$\frac{u_{AB}}{R_L + R_1} = \frac{u_{R_1}}{R_1}$ 或 $R_L = \frac{u_{AB}R_1}{u_{R_1}} - R_1$ ， R_L 即为电感的损耗电阻，测出不同频率时的 u_{AB} 和 u_{R_1} 并计算出相应的 R_L （不同频率的 R_L 是否相同？为什么？）

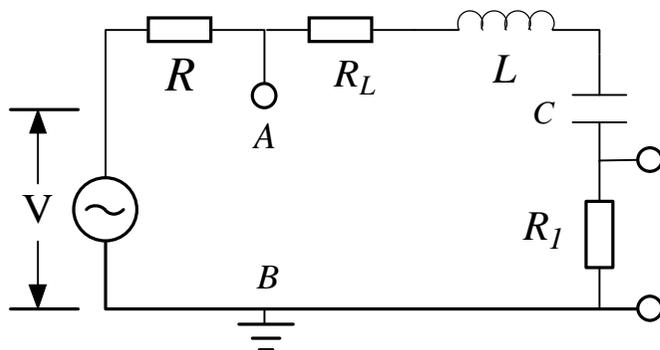


图 4.10 电感损耗电阻的测量

(6)、高阶次谐波振幅测量值的修正

由于趋肤效应，不同频率时电感的损耗电阻 R_L 是不同的，以 $n=3$ 时的谐波（3kHz）为例，若方波的 3kHz 的正弦分量电压为 u ，电感的损耗电阻为 R'_{L_3} ，电阻 R_1 两端的电压为 u'_3 ，则 $u = \frac{u'_3}{R_1} (R_1 + R_i + R'_{L_3})$ ，设电感的损耗电阻不随频率变化，始终为 R_L 则这时 R_L 两端的电压应是 u_3 即有 $u = \frac{u_3}{R_1} (R_1 + R_i + R_{L_3})$ 经校正

后, 3KHz 的振幅值应为 $u_3 = u_3 \frac{R_1 + R_1 + R_{L_3}}{R_1 + R_1 + R_{L_3}}$

五. 思考题

1、在 RLC 电路中, 改变电阻 R_1 使电路的 Q 变化, 观察串联谐振电路的选频效应, 并说明 Q 的物理意义。

2、证明在方波的合成过程中, 方波的振幅与基频的振幅之比为 $1: \frac{4}{\pi}$ (可参考图 3-1 中不同 b 时的波形振幅)。

六、实验报告要求:

分析比较 RLC 串联谐振电路和有源带通滤波器的选频特性有何区别。