

913936

# 机械工 程 测 试 技 术 基 础 实 验

华中理工大学 杜润生  
上海第二工业大学 王崇义 合编



机械工业出版社

57

913936

4432

57  
4432

# 机械工程测试技术基础实验

华中理工大学 杜润生  
上海第二工业大学 王崇义 合编



机械工业出版社

全书共编写了十个实验。其中包括：基本实验四个，选作实验三个，扩充选作实验三个。对有些实验介绍了多种可选择的实验方案，并在附录中对实验数据的最小二乘拟合，实验报告的书写等作了说明。

本书注重实用性，着重介绍每个实验的实验原理、方法及注意事项，对实验数据的处理提出了要求，并提供了一些思考题，以开拓实验思路。

### 机械工程测试技术基础实验

华中理工大学 杜润生 合编  
上海第二工业大学 王崇德

责任编辑：林松 责任校对：韩晶  
责任印制：张俊民 版式设计：霍永明

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $5^{1/4}$ ·字数122千字

1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷

印数0,001-5,100·定价：1.20元

ISBN 7-111-02008-1/TH·335(课)

## 前 言

本书是《机械工程测试技术基础》的配套教材，适用于高等学校各种机械设计和机械制造类专业，也可供从事机械工程测试工作的工程技术人员参考。

“机械工程测试技术基础”是一门实践性很强的课程，教学实验在其中占有极其重要的地位。数年来从事这门课程教学的教师、实验工作人员付出了大量的辛勤劳动，根据教学要求，结合实际条件设计了许多教学实验，极大地提高了教学质量。全国高校机械工程测试技术研究会实验技术组于1980年、1982年、1986年先后三次在收集全国高校已开实验资料的基础上，编辑、印发了《机械制造中的测试技术实验指导书汇集》、《机械工程测试技术基础实验指导书选编》(I)、(II)。对交流、促进教学实验起了重要作用。早在1983年初，一机部高等工业学校“测试技术”教材编审小组和全国高校机械工程测试技术研究会就已安排了教学实验教材的编写工作。1987年由西安交通大学王光铨主编，傅庭和、王文兰、王崇义、杜润生等同志参加编写的《机械工程测试技术教学实验》(待定稿)为本书的编写提供了参考资料。

本书共编了十个实验。其中：基本实验为一、二、五、七，选作实验为三、四、八，实验六、九、十可根据设备条件做演示或作为扩充选作实验。实验一~八是按《机械工程测试技术基础》一书的章节顺序安排的，可在教学中相互配合使用。由于同一个实验可以采取不同的实验方案，本书对有些实验介绍了几种方法可供选择。为了使用的方便，我们力求对每一种方法都按独立的实验要求编写。

为了加强学生实验能力的培养，对每个实验我们都着重介绍实验原理、方法及注意事项。对实验数据的处理只提出了要求，并提供了一些思考题，以开拓实验思路。另外在附录中对实验数据的最小二乘拟合，实验报告的书写要求等作了说明。

本书是机械委高等工业学校机电、兵工类专业教学指导委员会“测试技术”课程教学指导小组在广泛征求意见的基础上，安排华中理工大学杜润生和上海第二工业大学王崇义合编的。

本书由厦门大学黄长艺教授主审。参加审稿的还有厦门大学李竞白副教授等。

本书在编写过程中参考了一些兄弟院校的实验资料，并得到许多老师的指导，受到许多同志的热情支持和帮助，在此一并谨致感谢。

由于我们的水平有限，在编写过程中考虑不周和错误之处，诚恳地希望读者批评指正。

编 者

1989.1于厦门

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 实验一 周期信号波形的叠加与分解 .....        | 1  |
| § 1-1 同频率正、余弦信号的叠加及矢量合成 ..... | 1  |
| § 1-2 周期信号波形的叠加与分解 .....      | 4  |
| 实验二 位移测量仪静态特性参数的测试 .....      | 16 |
| 实验三 压电式加速度计灵敏度的校准 .....       | 19 |
| 实验四 滤波器幅频特性的测试 .....          | 24 |
| 实验五 光线示波器振动物子动态特性的测试 .....    | 26 |
| § 5-1 光线示波器振动物子幅—频特性的测定 ..... | 26 |
| § 5-2 光线示波器振动物子相—频特性的测定 ..... | 28 |
| § 5-3 光线示波器振动物子阻尼比的测定 .....   | 29 |
| 实验六 相关分析及其应用 .....            | 32 |
| § 6-1 相关函数的求取 .....           | 32 |
| § 6-2 相关分析的应用 .....           | 37 |
| 实验七 悬臂梁动态特性参数的测试 .....        | 43 |
| § 7-1 稳态正弦激振 .....            | 43 |
| § 7-2 随机激振 .....              | 45 |
| § 7-3 瞬态激振 .....              | 46 |
| 实验八 回转轴误差运动的测试 .....          | 48 |
| 实验九 典型信号的数字分析 .....           | 55 |
| 实验十 窗函数及其对频谱的影响 .....         | 57 |
| 附录一 TP801单板机合成周期信号实验程序 .....  | 66 |
| 附录二 直线拟合——一元线性回归 .....        | 70 |
| 附录三 实验报告的要求及书写 .....          | 74 |
| 参考文献 .....                    | 77 |

## 实验一 周期信号波形的叠加与分解

根据傅里叶级数的理论, 满足狄里赫利条件的复杂周期信号  $x(t)$  都可以展开为

$$\begin{aligned}x(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n)\end{aligned}\quad (1-1)$$

其中

$$\begin{aligned}a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt \\ A_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \theta_n &= \arctan \frac{b_n}{a_n}\end{aligned}$$

式中  $T$ ——信号的周期;

$\omega_0$ ——圆频率,  $\omega_0 = 2\pi/T$ ;

$n = 1, 2, 3, \dots$ 。

可见复杂的周期信号  $x(t)$  是由无穷多个不同频率、不同幅值和不同相位的简谐信号叠加而成的。因此可以用简谐信号叠加合成复杂的周期信号, 反之周期信号也可以分解为许多简谐信号。

本实验是用实验方法来观察周期信号的叠加和分解的原理及过程的。其中包括两部分内容: ①同频率正、余弦信号的叠加及矢量合成; ②用三种不同方法进行周期信号波形的叠加与分解。

### §1-1 同频率正、余弦信号的叠加及矢量合成

#### 一、实验目的

1. 观察一对频率相同、幅值可变的余弦信号  $\pm a_n \cos n\omega_0 t$  和正弦信号  $\pm b_n \sin n\omega_0 t$  的叠加图形和合成矢量图。

2. 理解式 (1-1) 中的  $a_n$ 、 $b_n$  和  $A_n$ 、 $\theta_n$  之间的关系。

#### 二、实验原理

由式 (1-1) 可知,  $a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t = A_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n)$ 。这个关系可以用图 1-1 来表达。实验是用 FT-1 B 傅里叶分析仪来验证这种关系。

同频率正、余弦信号的叠加实验框图如图 1-2 所示。由 FT-1 B 傅里叶分析仪的正、余弦

信号发生单元，输出一对同频率的正、余弦信号，分别送给两只桥式调压放大器，其输出为一对幅值的大小和正、负可调的同频率正、余弦信号，即 $\pm a_n \cos n\omega_0 t$ 和 $\pm b_n \sin n\omega_0 t$ 。经加法器相加，用示波器便可观察到图1-1 a所示的波形。当改变正、余弦信号的幅值 $a_n$ 和 $b_n$ 时，示波器上显示的叠加波形的幅值 $A_n$ 也会发生变化。同时叠加波形在时间轴上向左或向右移动 $\tau$ 距离。因为 $\tau\omega_0 = \theta_n$ ，所以也显示出合成波的相位发生了变化。

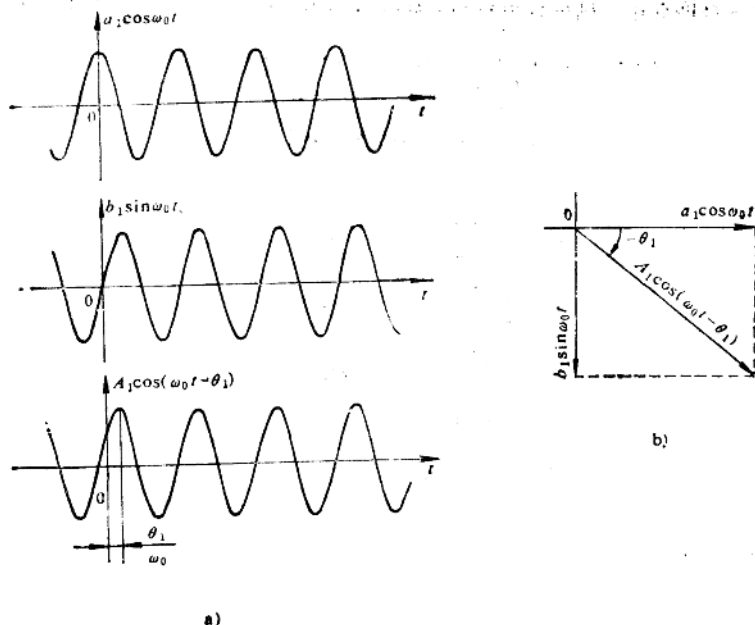


图1-1 同频率正、余弦信号的叠加与矢量合成  
a) 波形叠加 b) 矢量合成

若将 $\pm a_n \cos n\omega_0 t$ 和 $\pm b_n \sin n\omega_0 t$ 分别输入到两个乘法器中，与 $\cos n\omega_0 t$ 和 $\sin n\omega_0 t$ 相乘，经积分平均，然后输入到示波器的X轴与Y轴输入端，则可以在示波器上观察到一个光点，仪器的工作原理如图1-3所示。

从示波器中心原点到光点的连线即为 $A_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n)$ 的幅值 $A_n$ ，而X轴与这条连线的夹角为 $\theta_n$ 。当改变正、余弦信号的幅值 $a_n$ 和 $b_n$ 时，显示器上的光点便会移动。这显示出 $A_n$ 、 $\theta_n$ 随 $a_n$ 、 $b_n$ 变化的规律。

### 三、实验仪器和设备

#### 1. FT-1B 傅里叶分析仪

仪

一台

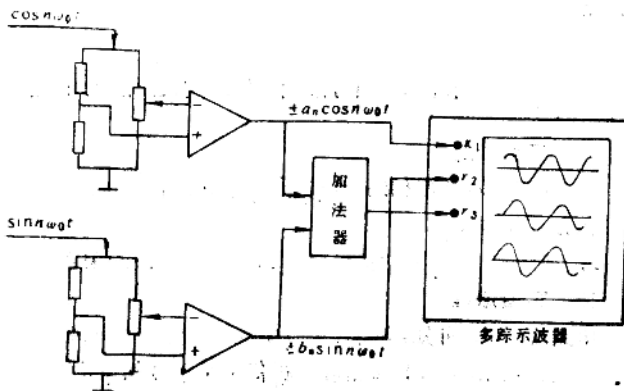


图1-2 同频率正、余弦信号的叠加

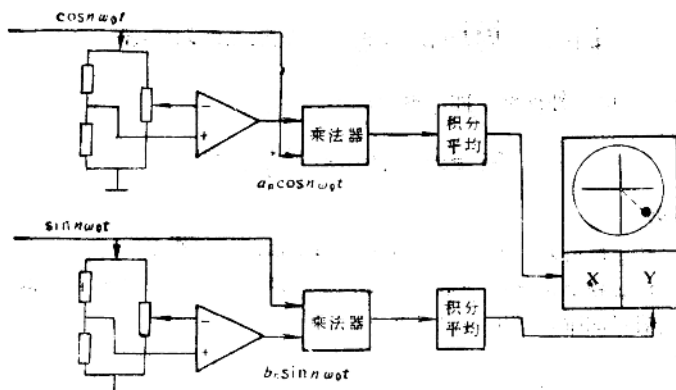


图1-3 同频率正、余弦信号的矢量合成

2. 多踪示波器

一台

3. 普通单踪示波器

一台

#### 四、实验步骤、方法和注意事项

1. 阅读FT-1B傅里叶分析仪使用说明书的有关内容,按说明书所述的方法对仪器进行调零。

2. 调节两桥式调压放大器的旋钮,得到信号 $\pm a_n \cos n\omega_0 t$ 和 $\pm b_n \sin n\omega_0 t$ 。把放大器的输出接到多踪示波器的输入端,即显示出波形。

3. 将两放大器的输出信号送入加法器,再将相加后的信号送入多踪示波器的第三路输入端,显示叠加后的波形。

实验时为了使显示波形不左右漂移,可由信号发生单元取一同频正弦信号,作为多踪示波器的外同步信号,以锁住示波器显示的波形。

4. 调节两桥式调压放大器的旋钮,用来改变幅值 $a_n$ 和 $b_n$ 的大小及正负,观察 $\pm a_n \cos n\omega_0 t$ 、 $\pm b_n \sin n\omega_0 t$ 以及由它们叠加的波形变化情况。

5. 进行矢量合成实验时,先按下琴键开关(通道2),并将通道2乘法器输入方式选择开关打向下方。

6. 由仪器上的信号发生单元,输出一对等幅值的正、余弦信号至示波器的Y轴和X轴,调节示波器上的输入衰减器,使屏幕上显示一个李沙育正圆图形。如果示波器的X轴无衰减器,可以外接一个470kΩ的电位器来代替。

7. 按图1-3连接实验电路。调节两桥式调压放大器的旋钮,便可在示波器上得到相应的矢量合成图。

#### 五、实验数据处理

选择三组不同的 $a_n$ 和 $b_n$ ,用波形叠加和矢量合成图的方法测出相应的 $A_n$ 和 $\theta_n$ ,并与理论计算值进行比较。

#### 六、思考题

用波形叠加图和矢量合成图来解释式(1-1)中的 $A_n$ 、 $\theta_n$ 与 $a_n$ 、 $b_n$ 之间的关系。



## §1-2 周期信号波形的叠加与分解

本实验可以分别用三种仪器，即三种方法来完成。

### 方法一 傅里叶分析法

#### 一、实验目的

1. 观察傅里叶系数 $a_n$ 和 $b_n$ 的形成过程及它们与谐波幅值 $A_n$ 的关系。
2. 验证满足狄里赫利条件的周期信号是由多个成谐波关系的正弦信号叠加而成的。
3. 了解周期信号的幅值谱的物理意义。

#### 二、实验原理

对周期信号进行傅里叶级数展开的关键是求出式(1-1)中的 $a_0$ 、 $a_n$ 、 $b_n$ 等系数。本实验仪器是利用模拟电子线路来实现求系数运算的。实验仪器原理框图如图1-4所示。根据 $a_n$ 、 $b_n$ 的定义，它们分别是信号 $x(t)$ 与 $\cos n\omega_0 t$ 和 $\sin n\omega_0 t$ 相乘，再经积分平均运算求得的。实际上是把信号 $x(t)$ 中所包含的 $\cos n\omega_0 t$ 成分和 $\sin n\omega_0 t$ 成分取出来。而幅值 $a_n$ 和 $b_n$ 的大小，就反映了信号 $x(t)$ 中所含 $\cos n\omega_0 t$ 和 $\sin n\omega_0 t$ 成分的大小。如图1-5 a、b分别表示了当 $x(t)$ 为周期的等占空比偶方波时， $x(t)$ 与同频率的 $\cos \omega_0 t$ 和 $\sin \omega_0 t$ 相乘的波形。对相乘的波形再积分平均后，可得到 $a_1=4A/x_1$ ， $b_1=0$ 。如果能将 $\cos \omega_0 t$ 和 $\sin \omega_0 t$ 中的频率 $\omega_0$ 变为 $2\omega_0$ 、 $3\omega_0 \cdots n\omega_0$ ，则可以得到 $x(t)$ 中各次谐波正、余弦分量的幅值。

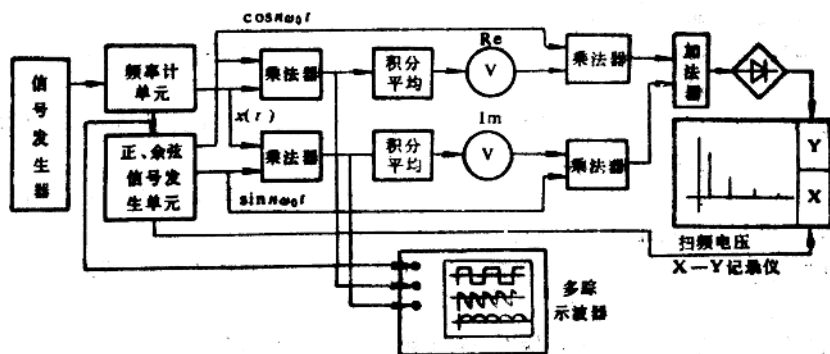


图1-4 周期信号的傅里叶级数展开实验原理

实验是对周期等占空比奇方波 $x(t)$ 进行展开。实验时，由外部信号源向FT-1B傅里叶分析仪的频率计单元输入一频率为 $\omega_0$ 的正弦信号（也可以输入其它波形的周期信号），频率计单元便产生一同频率的等占空比奇方波。用此方波的前沿，触发同频率正、余弦信号发生单元，使它产生一对与方波同频或呈倍频 $n\omega_0$ 关系的正、余弦信号。再将它们分别与方波信号 $x(t)$ 相乘，经积分平均，便可以得到方波中所包含的各次谐波分量的幅值 $a_n$ 和 $b_n$ 。其值的大小分别由Re和Im表头读出。另外，从仪器乘法器的输出端，能直观地看到正、余弦信号与方波相乘后的波形。实际上 $a_n$ 、 $b_n$ 值是波形中一个周期所包容的面积。再将 $a_n$ 和 $b_n$ 经仪器

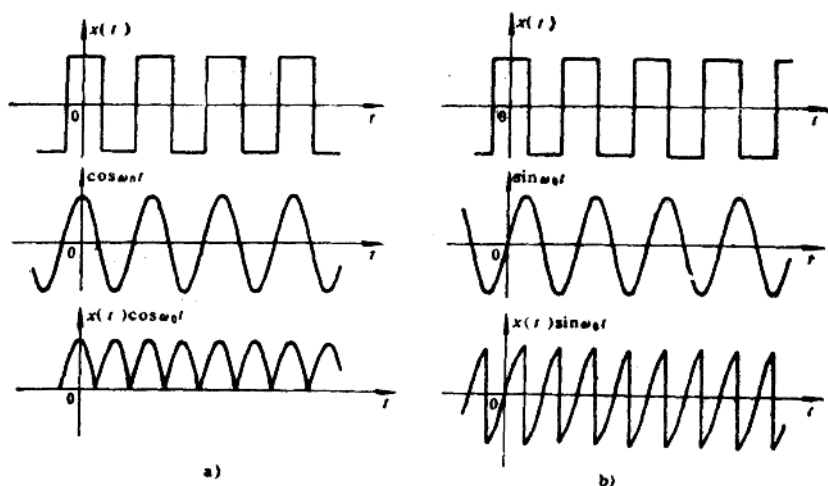


图1-5 波形相乘的图形

通道 2 的两乘法器，分别与  $\cos n\omega_0 t$  和  $\sin n\omega_0 t$  相乘后相加，加法器的输出是  $x(t)$  的某次谐波分量值  $A_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n)$ 。由表头  $Re \mu_1$  以读出  $A_n$  值。用同样方法也可以对其它非正弦的周期信号进行傅里叶级数展开。

周期信号的叠加合成实验框图如图 1-6 所示。由各谐波分量  $A_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n)$  叠加，可得到相应的周期信号波形。

### 三、实验仪器和设备

- |                  |    |
|------------------|----|
| 1. 信号发生器         | 一台 |
| 2. FT-1 B 傅里叶分析仪 | 一台 |
| 3. BD-1 波形合成仪    | 一台 |
| 4. 多踪示波器         | 一台 |
| 5. X-Y 函数记录仪     | 一台 |

### 四、实验步骤、方法和注意事项

1. 观察信号的傅里叶系数  $a_n$ 、 $b_n$ 。

(1) 按 FT-1 B 傅里叶分析仪使用说明书所述的方法，对仪器进行调零。然后按下仪器上“相关滤波”键，仪器便自动按图 1-4 接成实验系统。

(2) 由信号发生器输出一适当频率的正弦信号，经 FT-1 B 上的频率计单元转变为一方波信号。调节“电平调节”旋钮，使输出的方波呈等占空比方波。

(3) 调“倍频”选择开关至“1”位置。调“扫频控制”选择开关至“外同步”位置。使频率计单元输出的方波，触发控制信号发生单元。待外同步指示灯停止闪烁，信号发生单元便产生一对与方波同频率的正、余弦信号。这一对信号，由机内连线送入仪器中相应的乘法器。

(4) 将等占空比方波信号，用外部连接线输入到通道 1 作为被分析信号。

(5) 按下零键开关中的通道 1 键，将调零拨动开关拨至“DC”位置，并选择“衰减”

开关至3V或10V位置。便可在Re和Im两表头上读得 $a_1$ 和 $b_1$ 值。用示波器观察两个乘法器的输出波形。注意波形在一个周期内所包容的面积和表头示值 $a_1$ ,  $b_1$ 的关系。

(6) 依次选择“倍频”开关的倍率,使信号发生单元产生与方波频率成二倍频、三倍频、……等关系的正、余弦信号。从而分别得到 $a_2$ ,  $b_2$ ,  $a_3$ ,  $b_3$ ……等各次谐波的傅里叶系数,以及与之对应的乘法器的输出波形。

## 2. 作信号的频谱图

(1) 在步骤1的基础上,再次按下琴键开关“相关滤波”键,并将通道2的输入选择开关打至下方。通道1“衰减”选择为3V,通道2“衰减”选择为10V。这时仪器便按图1-4接成实验系统,可由X-Y记录仪绘出信号的频谱图。

(2) 用示波器观察加法器Ⅱ的输入信号,即可看到被分析信号的各次谐波波形。同时可以从Re表头上读得各次谐波的幅值。

(3) 调节频率计单元的“电平调节”旋钮,以改变方波的占空比,重复上述实验步骤1、2。

(4) 若需要分析其他形式的周期信号,将实验步骤1(4)中的外部连接线断开,让被分析的信号直接输入到通道1,然后按上述步骤进行。

## 3. 波形合成

(1) 用BD-1波形合成仪,按图1-6接成实验系统。

(2) 调节各次谐波的幅值和相位,使它满足式(1-2)的要求。

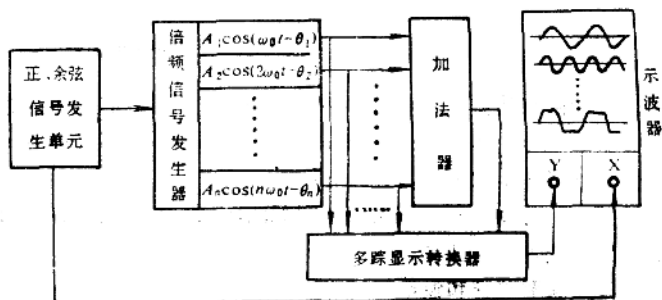


图1-6 周期信号的合成

$$x(t) = \cos \omega_0 t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t - \dots \quad (1-2)$$

(3) 逐次加入各谐波分量,直至七次谐波叠加,观察合成波形。

(4) 改变某次谐波的幅值或相位,观察合成波形的畸变。以了解谐波的幅值或相位对合成波形的影响。

(5) 按上述步骤合成其他波形的周期信号。

## 五、实验数据处理

1. 根据实验步骤1,画出作方波分析时,通道1两乘法器输出的一、二、三次谐波的波形图。

2. 整理出等占空比方波的各次谐波的幅值,画出频谱图。

## 六、思考题

1. 根据步骤1得到的图形,说明 $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $a_3$ ,  $b_3$ 的形成原理及它们与相应各次谐波的关系。

2. 比较用X-Y记录仪作出的方波频谱图与计算得到的频谱图有何相同及不同之处,并

说明为什么?

3. 用BD-1波形合成仪合成的方波与理论方波有何不同之处, 为什么?
4. 解释波形合成实验中, 合成波形产生畸变的原因。

## 方法二 谐波分析法

### 一、实验目的

1. 掌握用带通滤波器将非正弦周期信号分解成各次谐波的方法。验证周期锯齿波和周期方波的傅里叶级数展开式的正确性。
2. 掌握用各次谐波合成为一定周期信号的方法。
3. 了解带通滤波器的特性及其在信号分析中的应用。
4. 掌握用示波器检查各高次谐波与基波之间的初始相位差是否为零的方法。

### 二、实验原理

#### 1. 周期信号的分解

XPF-I型谐波分析仪上的信号源, 所提供的周期锯齿波信号如图1-7所示。在一个周期内, 它可以表示为:

$$x(t) = \frac{A}{T}t - \frac{A}{2} \quad 0 \leq t \leq T \quad (1-3)$$

其傅里叶级数的三角函数展开式为:

$$x(t) = \frac{A}{2\pi} \left[ \sin(\omega_0 t + \pi) + \frac{1}{2} \sin(2\omega_0 t + \pi) + \dots \right] \quad (1-4)$$

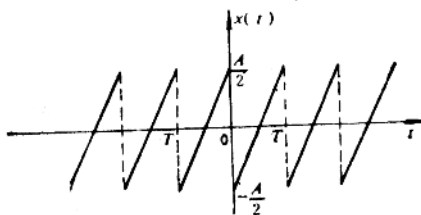


图1-7 信号源提供的周期锯齿波

式中  $A$ ——锯齿波幅值。

由式(1-4)可见, 锯齿波  $x(t)$  可以分解为基波、二次谐波、三次谐波……直至无穷多次谐波之和。基波的幅值为  $A/2\pi$ , 其它各次谐波的幅值分别为基波幅值的  $1/n$  ( $n$  为谐波次数)。各次谐波之间的初始相位差为零。而工程实际中, 往往只能取有限的谐波项, 所以可采用一定的电路来作谐波分析。XPF-I型谐波分析仪是采用七个相同类型的带通滤波器串联, 作谐波分析的。七个带通滤波器的中心频率分别为100Hz、200Hz、300Hz、400Hz、500Hz、600Hz、700Hz, 滤波器的幅频和相频特性曲线如图1-8所示。XPF-I型谐波分析仪电路原理框图如图1-9所示。

由图1-8a可以看出, 当  $\omega = \omega_0$  时, 即在中心频率处, 带通滤波器的输出最大。偏离中心频率则输出减小。由图1-8b可以看出, 当  $\omega = \omega_0$  时, 输出信号与输入信号之间的相位差为  $-180^\circ$ , 偏离中心频率则产生新的相移。实验中利用这两个特点来调整滤波器的中心频率, 改变和调节谐波的相位。

当周期锯齿波信号同时送入七个滤波器的输入端以后, 在其输出端可同时观察到七个谐波波形。各次谐波的初始相位角均可分别进行微调。

#### 2. 波形的合成

波形合成是由仪器上“符号选择”、“幅值调节”和“加法器”三部分电路完成的。合成时, 利用七个带通滤波器输出的不同频率的正弦波, 根据待合成波形的要求, 选择频率成分, 幅值比例及相位关系, 最后由加法器进行谐波相加便可合成。一般可以合成得到方波、锯齿

波和三角波等周期信号的近似波形。

图1-10为XPF-I型谐波分析仪的面板图。图中开关 $S_1, S_2, \dots, S_7$ 用来选择所需要的谐波成分。“符号选择开关”用来确定各次谐波的相位,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_7$ 用来微调相位。 $A_1, A_2, \dots, A_7$ 用来调节各次谐波的幅值。

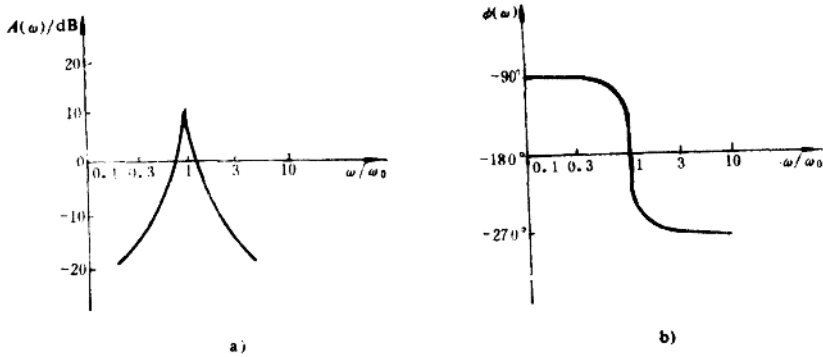


图1-8 滤波器幅频和相频特性曲线

a) 幅频特性 b) 相频特性

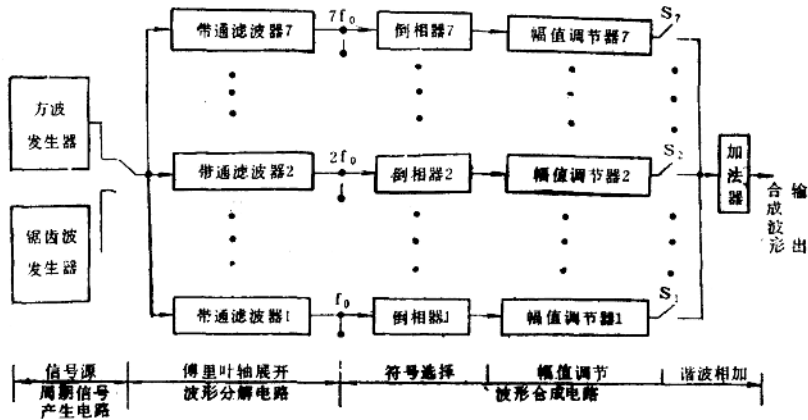


图1-9 谐波分析仪电路原理框图

### 三、实验仪器和设备

1. XPF-I (或 II) 型谐波分析实验仪
2. 毫伏表
3. 双踪示波器
4. 频率计

一台  
一台  
一台  
一台

### 四、实验步骤、方法和注意事项

#### 1. 周期信号的分解

(1) 开启仪器电源开关, 若指示灯 $+U_e$ 和 $-U_e$ 均亮, 则表示仪器正常。

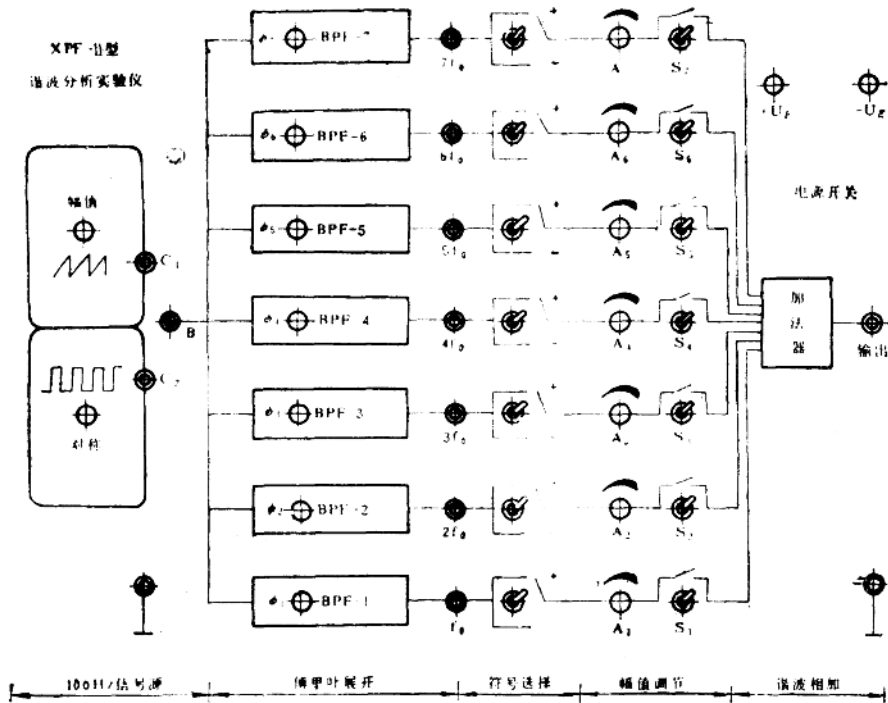


图1-10 XPF-I型谐波分析仪面板图

(2) 用示波器从 $C_1$ 点观察锯齿波图形。从 $C_2$ 点观察方波图形，调节对称旋钮，使方波成为等占空比方波。

(3) 用插接线连接 $C_1$ 与 $B$ 两点（即把锯齿波信号送到各带通滤波器）。从 $B$ 点测量信号的频率。

(4) 缓慢调节 $\phi_1$ 电位器，并在 $f_0$ 处用毫伏表测量幅值，当幅值最大时，则BPF-1的中心频率与信号频率相同。调节锯齿波的幅值，使 $f_0$ 处的基波幅值为1V。

(5) 依次调节 $\phi_2, \phi_3, \dots, \phi_7$ 使 $2f_0, 3f_0, \dots, 7f_0$ 处的幅值最大。

(6) 接通开关 $S_1$ ，调节 $A_1$ ，使加法器输出端的幅值为1V。然后断开 $S_1$ 。再用同样的方法依次调节 $A_2, A_3, \dots, A_7$ ，使各次谐波的幅值为基波幅值的 $1/n$ 。

(7) 观察各次谐波与基波之间的相位差值是否为零。若不为零，则以 $\phi_1$ 为基准，微调与各次谐波对应的电位器 $\phi_2, \phi_3, \dots, \phi_7$ 。观察的方法可以采用李沙育图形法和两波形叠加图形法。采用李沙育图形法时，基波与各次谐波的相位差为零，在示波器上可分别显示图1-11所示图形。当相位差不为零时，其图形必有扭曲。注意观察图中关键点的位置，只要关键点位置正确，就可以较方便地判断出相位差是否为零。采用两波形叠加图形法时，相位差值为零的波形可参考图1-17。不为零的波形可参考图1-20。

(8) 测量、记录各次谐波的频率和幅值，以供绘制频谱图和与理论计算对照用。

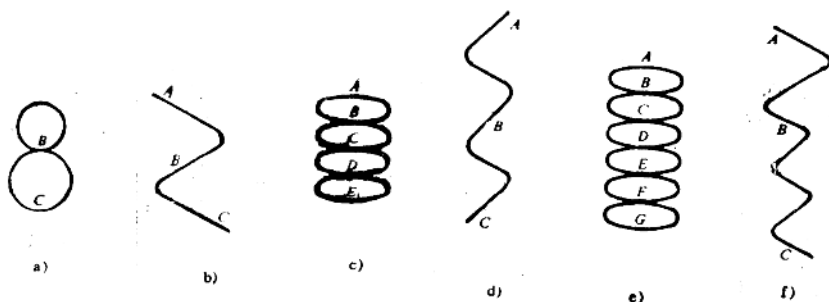


图1-1 李沙育图形

a) 二倍频 b) 三倍频 c) 四倍频 d) 五倍频 e) 六倍频 f) 七倍频

(9) 把插接线从  $C_1$  改接到  $C_2$ , 按上述方法对方波进行谐波分析。

## 2. 波形的合成

(1) 利用分解锯齿波得到的各频率成分的正弦波, 保持  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$  位置不变(即保持各高次谐波与基波之间的相位差为零不变)。

(2) 根据式(1-5), 将基波幅值定为1V(即  $U_{A1}=1V$ ), 调节  $A_2, A_3, \dots, A_n$ , 拨动符号选择开关, 接通相应的频率成分开关  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , 在加法器输出点, 用示波器可以观察到图1-12所示的合成波形。

$$x(t) = \sin(2\pi f_0 t + \pi) + \frac{1}{2} \sin[2\pi(2f_0)t + \pi] + \dots \quad (1-5)$$

(3) 根据式(1-6)或式(1-7)按上述步骤合成图1-13或图1-14波形

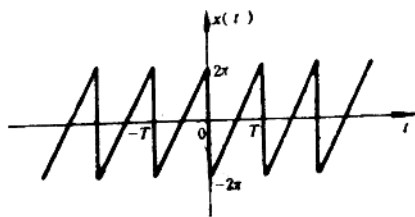


图1-12 周期锯齿波

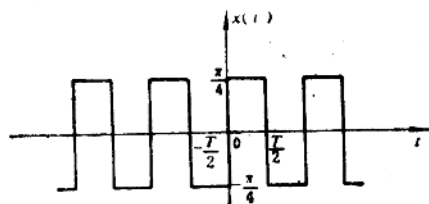


图1-13 周期方波

$$x(t) = \sin 2\pi(f_0)t + \frac{1}{3} \sin 2\pi(3f_0)t + \dots \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned} x(t) = & \sin 2\pi(f_0)t - \frac{1}{3^2} \sin 2\pi(3f_0)t + \frac{1}{5^2} \sin 2\pi(5f_0)t \\ & - \frac{1}{7^2} \sin 2\pi(7f_0)t \dots \end{aligned} \quad (1-7)$$

## 3. 观察合成波形的畸变

(1) 分别开或关  $S_1, S_2$  和  $S_3, S_4$  等开关, 观察少某次频率谐波后, 合成波形畸变的情况。

(2) 分别改变  $A_1, A_2, \dots, A_n$  旋钮的位置, 观察各次谐波幅值比例改变后, 合成波形发

生畸变的情况。

(3) 分别改变 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 和 $\phi_3$ 、 $\phi_4$ 等旋钮的位置, 观察合成波形发生畸变的情况。

### 五、实验数据处理

1. 列表整理出实测得的周期锯齿波和方波的频率、周期、幅值及分解后的各次谐波的频率和幅值。将实测值与理论计算值进行比较。

2. 画出实测得的周期锯齿波和方波的频谱图。

3. 画出畸变波形, 说明畸变原因。

### 六、思考题

1. 如果将图1-7所示的锯齿波的坐标移动, 使之成为图1-15所示的图形。试对其进行傅里叶级数展开, 比较两者之间的差异。

2. 合成波形不发生畸变需要保证哪些条件? 实验中如何保证? 用什么方法观察?

3. 在 $2f_0$ 、 $3f_0$ 、 $\dots$ 、 $7f_0$ 处观察谐波波形时, 会发现波形不等幅的现象, 且越是高次谐波, 这种现象越明显, 试分析这是什么原因? 如何才能改善这种情况? (提示: 提高带通滤波器的 $Q$ 值。此问题可在学习“滤波器”一节时再深入思考。)

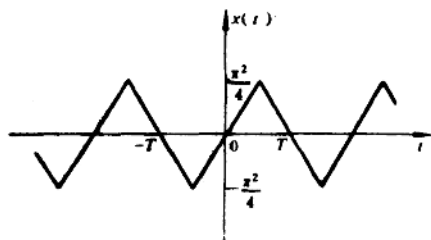


图1-14 周期三角波

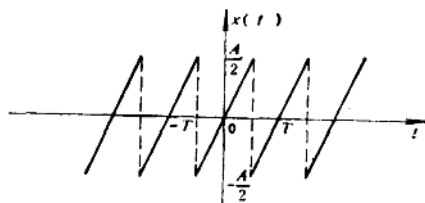


图1-15 周期锯齿波

## 方法三 TP801单板机法

### 一、实验目的

1. 观察由多个频率、幅值和相位成一定关系的正弦波叠加的合成波形。
2. 观察频率、幅值相同, 相位角不同的正弦波叠加的合成波形。
3. 了解用带通滤波器分解周期信号的方法。
4. 熟悉单板机的D/A转换器。

### 二、实验原理

1. 用正弦波叠加合成方波

根据傅里叶级数的理论, 图1-16所示方波的三角函数展开式为

$$x(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (1-8)$$

由此可见, 周期方波是由一系列频率成谐波关系、幅值成一定比例、相位角为零的正弦波叠加合成的。不过, 在用正弦波合成方波时, 由于式(1-8)收敛得很慢, 当用有限项正弦波去逼近 $x(t)$ , 得到的合成波形与理论方波相比会存在一定的误差。图1-17画出了一个周期的合成情况。图中虚线是理论方波 $x(t)$ , 实线是用有限项正弦波合成的波形。从图中可以看



到, 当谐波项数愈多时, 合成波形愈接近于理论方波。在间断点附近, 随着所含谐波项数的增多, 合成波形的突峰愈靠近间断点, 但突峰幅值并未明显减小。因此可以证明。即使合成波形所含谐波次数  $n \rightarrow \infty$ , 在间断点处仍有约 9% 的偏差, 这种现象称为吉布斯 (Gibbs) 现象。另外还可以看到, 频率较低的谐波, 其幅值较大, 它是组成方波的主体, 而频率较高的谐波幅值较小, 它们主要影响波形的细节, 波形中所包含的高次谐波愈多, 波形的边缘愈陡峭。

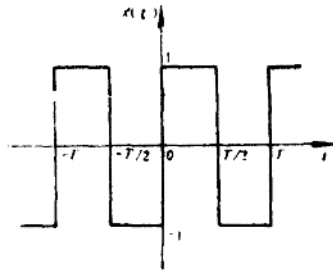


图1-16 方波

本实验仪器组合框图如图1-18所示。单板机按设置的谐波次数, 将满足式 (1-8) 要求的正弦值相加, 然后经D/A转换器输出合成波形的电压。将此电压送至示波器Y轴输入端, 便可观察到图1-17所示的合成波形。

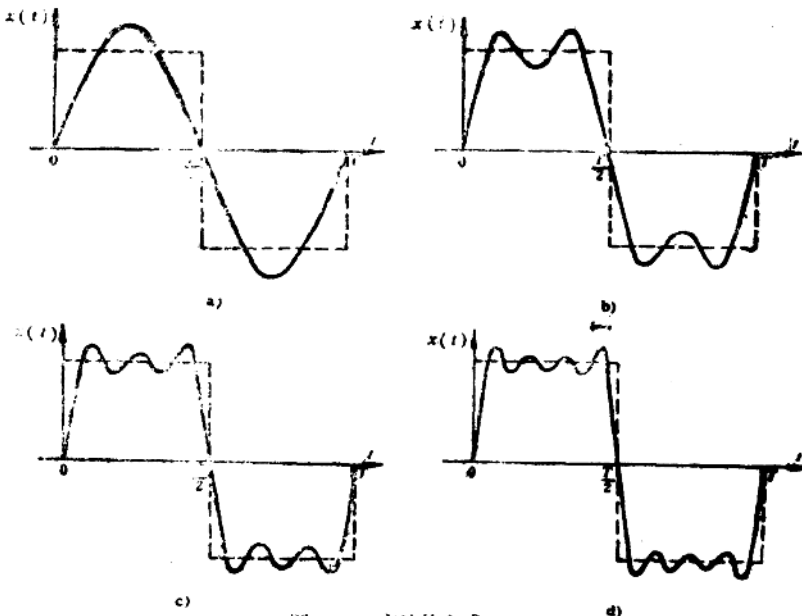


图1-17 方波的合成

a) 基波 b) 三次谐波相加 c) 五次谐波相加 d) 七次谐波相加

单板机产生满足式 (1-8) 要求的正弦值是采用查表方式实现的。程序中将根据基波正弦值数据, 制成为一定格式的表格, 叠加时, 每按一次键盘上的“F”键, 经相应的取值、计算, 在原来显示的波形上增加一次谐波分量值, 示波器显示出该次谐波正弦波形和叠加后的合成波形。而每按一次“E”键, 则表示减少一次谐波。同样从示波器上可以

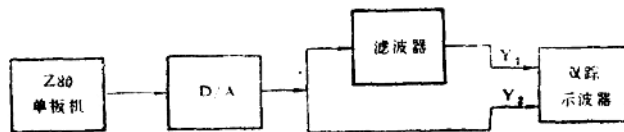


图1-18 实验仪器组合框图