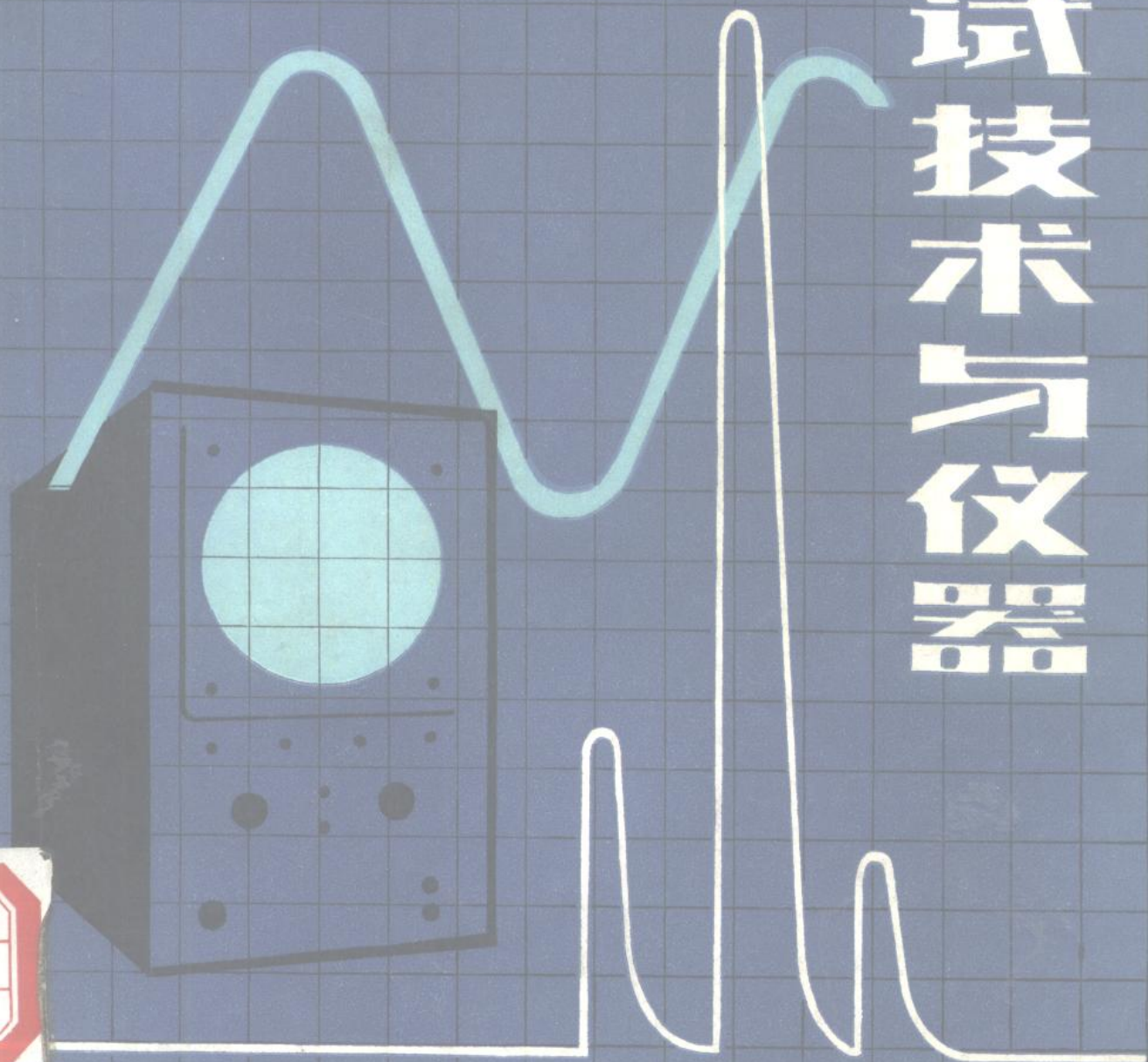


电路测试技术与仪器

朱锡仁 编著
谢沅清 主审



清华大学出版社



电路测试技术与仪器

朱锡仁 编著
谢沅清 主审



清华大学出版社

9010192

内 容 简 介

电路测试技术是工程技术人员的基本技能，在电子技术实践过程中，需要经常使用电子测量仪器，运用各种电子测量方法。本书第一篇讲述有关电子电路、电子产品的性能、参数的实用测试技术，第二篇介绍 21 个类别的国产电子测量仪器的基本原理、使用方法及实际测试经验与技巧。

本书可供从事电子技术实践的初、中级工程技术人员、实验技术人员阅读参考，也可作为工科高校电子技术基础的实验教材或教学参考书。

ZF72/05

电路测试技术与仪器

朱锡仁 编著

谢沅清 主审

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京市人民文学印刷厂印装

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：18 1/8 字数：429 千字

1989 年 8 月第 1 版 1990 年 1 月第 2 次印刷

印数：10001-16000

ISBN 7-302-00435-8/TN·8

定价：3.65 元

91105

前 言

在电子技术实践过程中，需要经常使用电子测量仪器、运用各种电子测量方法，对电路（或电路元器件）进行性能、参数的测试。“工欲善其事，必先利其器”。要增强电子技术实践的能力，必须学习如何使用电子测量仪器、运用电子测量方法对电路或电路元器件进行性能、参数测试，并在实践中不断提高灵活运用各种测试技术的能力。编者在多年从事电子实践技术教学和电子工程实践的基础上，综合了电子电路试制实践中的测试技术、电子产品的调试工艺过程、电子设备的检定计量方法等实用测试技术，而写了这本《电路测试技术与仪器》。

本书分两篇。第一篇电路测试技术，有八章。分别介绍基本电参数测试技术、放大电路测试技术、电源电路测试技术、振荡电路测试技术、脉冲电路测试技术、电路元件参数测试技术、晶体管参数测试技术、集成电路参数测试技术。第二篇电路测试仪器，有十一章。分别介绍模拟电压表与电压测试技术、数字电压表及其应用、示波器与示波测试技术、信号发生器及其应用、电路元件参数测量仪及其测试技术、晶体管特性图示器及其测试技术、集成电路参数测试仪及其应用、频率特性测试仪及其应用、电子计数器及其应用、失真度测量仪及其应用、调制度测量仪及其应用。本篇选择了常用的 21 个类别的国产电子测量仪器，具体介绍了它们的基本原理、基本使用方法和测试技术。本书对仪器的介绍具有两个特点。一是在不涉及繁杂的仪器电路原理的基础上，用通俗易懂的语言讲清与仪器的使用方法、测试技术密切相关的基本测试原理，使读者不仅能自如地运用书中介绍的仪器，而且具备适应不同型号的电子测量仪器的能力。二是具体而详尽地叙述了仪器的使用经验和测试技巧。

本书可供从事电子技术实践的初、中级工程技术人员、实验技术人员阅读，同时可兼作工科高校电子类专业的电子技术基础实验教材或教学参考书。

本书的部分内容曾先后以独立成篇的形式发表于《电信技术》、《仪表技术》、《电测与仪表》、《无线电》、《仪器与未来》等刊物上，具有实用价值。部分内容作为教材在我校试用多年，效果较好。书中还选用了一些仪器生产厂和书刊上的资料。在本书编写过程中，曾得到校内外许多同志的大力支持和热情帮助。北京邮电学院的谢沅清教授审阅了全书。

但是由于编者水平有限，书中一定有错误和不妥之处，愿请读者批评指正。

朱锡仁

1989 年 2 月于上海科技大学分部

目 录

第一篇 电路测试技术

第一章 基本电参数测试技术	
第一节 电压的测量..... 1	第五节 放大电路放大倍数的 测试.....30
一、电压表测量法..... 1	第六节 放大电路频率特性的 测试.....34
二、示波器测量法..... 3	第七节 放大电路阻抗的测试.....39
第二节 频率的测量..... 4	第八节 放大电路噪声电压和信噪 比的测试.....44
一、示波器测量法..... 4	附 衰减电路测试技术.....45
二、电子计数器测量法..... 6	
三、拍频和差频测量法..... 7	第三章 电源电路测试技术
第三节 相位差的测量..... 8	第一节 电源电路及其测试指标.....46
一、示波器测量法..... 9	第二节 电源电路输出电压和输出 电压范围的测试.....46
二、比较法.....11	第三节 电源电路最大输出电流的 测试.....47
三、直读法.....12	第四节 电源电路过载保护的测 试.....48
第四节 失真度的测量.....12	第五节 电压调整率与稳压系数的 测试.....48
一、失真的基本概念.....12	第六节 输出电阻（内阻）与负载 调整率的测试.....50
二、非线性失真系数的测量.....13	第七节 交流输出阻抗 Z_o 的测试.....50
第五节 调制度的测量.....15	第八节 纹波电压降低比、纹波电 压与纹波因数的测试.....51
一、调幅系数的测量.....15	
二、调频指数和频偏的测量.....18	第四章 振荡电路测试技术
第二章 放大电路测试技术	第一节 振荡电路输出信号频率的 测试.....53
第一节 放大电路工作状态的测试 与调整.....21	第二节 振荡电路输出信号频率漂 移与频率稳定度的测试.....55
一、交流放大电路.....21	
二、直流放大电路.....24	
第二节 放大电路输出电压和输出 功率的测试.....26	
第三节 放大电路输出信号失真的 测试.....28	
第四节 放大电路输入灵敏度的 测试.....30	

第三节	振荡电路输出信号失真的测试	55
第四节	振荡电路输出信号频率特性的测试	56
第五节	振荡电路最大输出电压和功率的测试	57
第六节	石英晶体电路的测试	57

第五章 脉冲电路测试技术

第一节	脉冲电路工作状态的测试	61
第二节	脉冲重复周期和重复频率的测试	62
第三节	脉冲幅度的测试	63
第四节	脉冲持续时间(脉宽)的测试	65
第五节	脉冲前后过渡持续时间的测试	65
第六节	脉冲的过冲和预冲的测试	66
第七节	脉冲平顶倾斜的测试	67
第八节	脉冲电路输出电阻的测试	67
第九节	脉冲延迟时间的测试	68
第十节	触发脉冲的测试	69

第六章 电路元件参数测试技术

第一节	低频电路元件参数的测试	71
一、	基本原理	71
二、	常用的电桥电路	72
第二节	高频电路元件参数的测试	74
一、	电容量的测试	74
二、	电感量的测试	76
三、	品质因数(Q值)的测试	77

第七章 晶体管参数测试技术

第一节	晶体管反向截止电流的测试	79
第二节	晶体管反向击穿电压的测试	80
第三节	晶体管输出特性的测试	81
一、	逐点测试法	81
二、	图示测试法	82
第四节	晶体管电流放大系数的测试	83
一、	直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 的测试方法	84
二、	交流电流放大系数 β 的测试方法	84
第五节	晶体管输入特性的测试	85
一、	逐点测试法	85
二、	图示测试法	86
第六节	晶体管饱和压降的测试	86

第八章 集成电路参数测试技术

第一节	模拟集成电路参数测试技术	88
一、	输入失调特性的测试	88
二、	开环特性的测试	90
三、	共模特性的测试	92
四、	输出波形瞬态特性的测试	94
第二节	数字集成电路参数测试技术	95
一、	电路特性及其预检	95
二、	功率损耗特性参数的测试	98
三、	输出特性参数的测试	99
四、	输入特性参数的测试	100
五、	平均传输延迟时间的测试	101
六、	电压传输特性的测试	103

第二篇 电路测试仪器

第九章 模拟电压表与电压测试技术

第一节	万用电表及其测试技术	105
-----	------------	-----

第二节 电子电压表及其测试技术

技术	115
----	-----

第十章 数字电压表及其应用	
第一节 数字电压表的基本原理	125
一、逐次逼近比较型	125
二、斜坡式电压-时间(V/T) 变换型	126
三、双积分型	126
四、脉冲调宽型	127
五、复合型	128
第二节 直流数字电压表实例	128
第十一章 示波器与示波测试技术	
第一节 示波器的基本原理	132
一、示波器的基本组成	132
二、示波管的基本原理	133
三、波形显示的基本原理	134
四、双线、双踪示波的显示 原理	137
第二节 示波器的使用方法	141
一、单踪示波器的使用方法	141
二、双踪示波器的使用方法	146
第三节 示波器的测试技术	151
第十二章 信号发生器及其应用	
第一节 低频信号发生器及其 应用	156
第二节 高频信号发生器及其 应用	159
一、调幅高频信号发生器	159
二、调频高频信号发生器	164
第三节 脉冲信号发生器及其 应用	169
第十三章 电路元件参数测量仪 及其测试技术	
第一节 万用电桥及其测试技术	175
一、万用电桥的基本组成与 原理	175

二、万用电桥的使用方法和测试 技巧	176
第二节 Q表及其测试技术	182
一、Q表的基本组成与原理	182
二、Q表的使用方法和测试 技巧	184
第三节 高频电感电容测量仪及其 测试技术	193
一、测量仪的基本组成与原理	193
二、测量仪的使用方法和测试技 巧	196

第十四章 晶体管特性图示器 及其测试技术

第一节 图示器的基本组成与 原理	203
第二节 图示器的使用方法和测试 技术	203
一、面板装置	203
二、调整与使用	207
三、图示器的测试实例	209
四、晶体管异常特性曲线分析	227

第十五章 集成电路参数测试仪 及其应用

第一节 模拟集成电路参数测试仪 及其应用	232
一、运算放大器测试仪的基本 原理	232
二、运算放大器测试仪的应用	234
第二节 数字集成电路参数测试仪 及其应用	238
一、数字集成电路测试仪的基本 组成	238
二、数字集成电路测试仪的 应用	238

第十六章 频率特性测试仪 及其应用	
第一节 频率特性测试仪的基本组成和原理.....	242
一、扫(调)频信号发生器.....	243
二、频标系统.....	243
三、显示部分.....	244
第二节 频率特性测试仪的应用.....	244
一、面板装置.....	244
二、测试前的检查.....	246
三、电路幅频特性的基本测试方法.....	247
四、应用实例.....	249
第十七章 电子计数器及其应用	
第一节 电子计数器的基本工作原理.....	252
一、累加计数.....	252
二、外控时间间隔内的计数.....	252
三、测频率.....	253
四、测频率比.....	253
五、自校.....	254
六、测量 B 信号与 C 信号之间的时间间隔.....	254
七、测量相邻脉冲的时间间隔.....	254
八、测量周期.....	255
第二节 电子计数器的基本组成.....	255
一、输入电路(输入通道).....	255
二、计数显示电路.....	256
三、标准时间信号形成电路.....	257
四、控制电路.....	257
五、电源电路.....	257
第三节 电子计数器的应用.....	257
一、面板装置.....	258
二、使用前的准备工作.....	258
三、应用.....	260
附 变频器.....	262
第十八章 失真度测量仪及其应用	
第一节 失真度测量仪的基本组成和原理.....	265
第二节 失真度测量仪的应用.....	266
一、面板装置.....	267
二、使用方法与技巧.....	268
三、应用实例.....	270
第十九章 调制度测量仪 及其应用	
第一节 调幅度测量仪及其应用.....	272
一、基本组成和原理.....	272
二、基本使用方法和应用.....	272
第二节 调频测量仪及其应用.....	276
一、基本组成和原理.....	276
二、基本使用方法和应用.....	278
主要参考书目.....	282

第一篇 电路测试技术

第一章 基本电参数测试技术

第一节 电压的测量

电压是电子技术中最重要的基本参数之一。许多电参数都可视为电压的派生量，各种电路的工作状态通常都以电压的形式反映出来，而电子设备的各种信号也主要是用电压来表现。例如：功放电路的输出功率、谐振回路的品质因数（Q值）、信号波形的失真系数、调幅信号的调幅系数等电参数的测量都可以归结为电压的测量；电子设备和电路的输入信号、输出信号、控制信号和反馈信号通常都用电压来表示，在测得了这些信号的电压值后，就能掌握电子设备和电路的工作情况。因此，电压测量是电参数测量的基础。

目前广泛采用的电压测量方法主要有电压表测量法和示波器测量法两种。

一、电压表测量法

（一）直读测量法

直接由电压表的读数决定测量结果（电压值）的测量方法称为电压表的直读测量法。直读测量法简便直观，是电压测量的最基本方法。

用电压表测量法进行测量时，首先遇到的是如何选择电压表的问题。通常要根据被测信号的特点（如频率的高低、幅度的大小等）和被测电路的状态（如内阻的数值等）来考虑。以电压表的使用频率范围、测量电压范围和输入阻抗的高低作为选择电压表的依据。

被测信号必须处在电压表可以使用的频率范围内和可以测量的电压范围内，这是很明显的。这里再简单谈一谈输入阻抗的问题。因为电压表接入被测电路之后，必定会影响被测电路的工作状态，为了把这种影响限制在允许的范围内，应对电压表的输入阻抗提出一定的要求。对于直流或者低频电压，只需要考虑电压表的输入电阻足够大，对于高频电压除要求电压表有足够大的输入电阻外，尚要求其输入电容足够小。此外，对于工作于某些状态的电路进行电压测量时，还要考虑阻抗匹配问题。

另外，常用的交流电压表大多是以正弦电压的有效值来刻度的，因此只适合测量正弦电压有效值。但正弦电压的有效值、整流平均值、峰值及峰-峰值之间彼此有一定关系。在乘以适当的系数后可把一种值（例如有效值）变换为另一种值（例如峰值或峰-峰值）。表 1.1 列出了平均值（指全波整流平均值）、有效值、峰值、峰-峰值的转换关系，供测量电压时查阅。

表 1.1

系数 给定值	转换值	平均值	有效值	峰值	峰-峰值
平均值 *注		1	1.11	1.57	3.14
有效值		0.900	1	1.414	2.83
峰值		0.637	0.707	1	2.00
峰-峰值		0.318	0.354	0.500	1

注：这里的平均值是指全波整流后的平均值。

关于电压测量的精度问题。指针式仪表的精度是按满度相对误差分成 0.05、0.1、0.2、0.5、1.5、2.5、5.0 等几个等级。以 2.5 级精度来说，其满度相对误差为 $\pm 2.5\%$ 。在电压测量中，直流电压的测量精度一般比交流电压的测量精度高。通常在较高精度的电压测量中，采用数字式电压表。一般直流数字式电压表的测量精度在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 数量级，交流数字式电压表的测量精度在 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 数量级。

为了提高测量精度，除选用高精度的测量仪表外，尚需要对测量方法、测量环境等提出一定要求。在普通条件下对电路做一般性测量调试时，误差要求不甚高，通常在 $(1 \sim 3)\%$ 左右即可。

(二) 差值测量法

在电路的测量实践中，经常需要测量直流电压的微小变量。例如：直流稳压电源的电压调整率 S_D 和内阻 R_0 ，就是通过测量输出直流电压的微小变量求得的。在一般情况下，直流电压微小变量是采用高精度的数字式直流电压表来进行测量的。

在不具备数字式直流电压表的情况下，如果用指针式仪表（如万用表、直流电子电压表等）来直接测量直流电压的微小变量是难以实施的。因为被测直流电压值本身比较大，而变化量又相对比较小，所以若直接用指针式仪表的高量程档进行测量，由于高量程档的读数分辨率低，因此很难读出这个微小变量；若直接用指针式仪表的低量程档进行测量，由于被测值远远超过低档量程的上限，而会造成仪表严重过荷以致损坏。如果借助指针式仪表，运用差值法对直流电压的微小变量进行测量，则能清楚地读出微小的电压变化量。

差值法的测量如图 1.1 所示。图中采用一个直流电源作为辅助电源。辅助电源与直流电压表串联后，一起并联到被测直流电源的输出端负载电阻 R_L 上。若直流电压表的内阻远大于负载电阻 R_L ，则测量电路的分路作用可忽略不计。对于辅助电源，要求其电压值能调节到等于（或接近）被测电压的规定值。根据串联电压表的读数，可测量出被测电压的微小变化量。

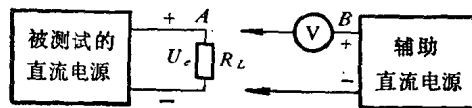


图 1.1 差值测量法原理图

一般情况下，由于差值远小于电压基本值，差值的测量误差对电压基本值的影响较

小，因此差值法中采用的指针式仪表的精度虽然不够高(通常在 2.5 级左右)，但对电压基本值的测量结果精度影响较小。通过误差计算可知，差值法对电压基本值测量结果的精度主要由辅助电源的精度决定。当然在测量电压基本值以外的情况，如测量直流稳压电源的电压调整率 S_D 和内阻 R_0 ，指针式仪表的精度对 S_D 和 R_0 的测量结果有较大的影响，此时为了提高测量精度，宜选择高精度的指针式仪表。

二、示波器测量法

用示波器测量电压除适宜于在观察电压波形的同时顺便测量其大小外，最主要的特点是能够正确地测定波形的峰值及波形各部分的大小，因此在需要测量某些非正弦波形的峰值或某部分波形的大小时，用示波器进行测量便成为必不可少的方法了。

示波器测量电压用的是比较法。进行测量时可按照图 1.2 所示布置测量电路。如要测矩形波电压值，先将开关 K 置于位置“1”，使被测的矩形波电压接于示波器的 y 轴输入端。示波器的 x 轴选择开关置于扫描档，适当调节扫描范围、扫描微调、整步调节，使荧光屏上显示稳定波形。适当调节 y 轴衰减、 y 轴增益，使荧光屏上所显示波形的垂直幅度 y_1 为一定值(例如 6cm)。然后保持 y 轴增益不变

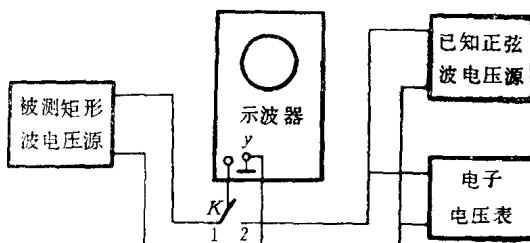


图 1.2 示波器比较法测量电压原理图

(即保持示波器的垂直灵敏度不变)，把开关 K 置于“2”，将一个频率相近的正弦波电压接入示波器的 y 轴输入端，在正弦波电压源的输出端并联一电子电压表。适当调节示波器面板控制装置(注意： y 轴增益保持不变)，使波形稳定。调节正弦波输出电压幅度，使荧光屏上波形的垂直幅度 y_2 等于 y_1 。若这时电压表的读数为 $8V$ ，因该读数是正弦电压的有效值，换算成正弦波电压的峰-峰值，得 $8V \times 2\sqrt{2} \approx 22.6V$ ，则被测矩形波电压也等于 $22.6V$ 。如果前后两次测量时垂直幅度 y_1 和 y_2 不相等，可利用公式 $V_1/V_2 = y_1/y_2$ 求出所测波形的幅度。

用比较法进行电压测量时，也可先将开关 K 置于“2”，使作为比较用的正弦波电压源先接于示波器的 y 轴输入端。适当调节示波器面板控制装置，使荧光屏上显示稳定的、垂直幅度一定的波形。用电子电压表测出这个比较信号电压的大小，计算出荧光屏上单位高度的电压值。这个值就是示波器此刻的垂直灵敏度。实际上为了计算方便，应使垂直灵敏度为一简单整数，例如 y 轴输入端输入一个有效值为 $1V$ 的正弦电压，其峰-峰值是 $2.8V$ ，调节 y 轴增益使信号波形在垂直方向占有 2.8 格，则此时荧光屏上每一格相当于 $1V$ 。然后保持 y 轴增益不变，把开关 K 置于位置“1”，使被测的矩形波电压接于示波器的 y 轴输入端。示波器面板上 y 轴增益旋钮保持不变，适当调节其它有关旋钮，使波形稳定。此时将荧光屏上被测波形垂直方向所占的格数乘以垂直灵敏度，就是被测电压的数值。这种测量方法在一些产品示波器(如 SBT-5 型同步示波器等)中被采纳。在这些示波器中，已知正弦波电压源通常由已知矩形波信号电压源代替，将这种已知信号称为比较信号，并且把矩形波的电压幅度分成许多级，以便在不同

幅度情况下选用。目前另一些产品示波器（如 SBM-10 型多用示波器等）的垂直衰减选择开关上一般都直接标出该档的垂直灵敏度（V/格）。即荧光屏上每格代表的电压值。示波器在使用前用自身的校准信号（已知方波）校准后，即可根据垂直衰减选择开关所在位置的格（V/格）读数和荧光屏上波形的相应尺寸求得电压值。

示波器法测量电压除上面介绍的交流电压比较法外，还有一种直流电压比较法（在一些产品示波器如 SBE-7 型双踪示波器等中被采用）。因为两种方法的基本原理和方法相似，这里不再重复叙述。

顺便指出，用示波器也可以测量电流的大小，其方法是把被测信号电流通过一个数值较小的电阻（以免对被测电路产生较大的影响），然后用测量电压的方法测出电阻上的电压降，便可换算出电流的大小。

第二节 频率的测量

频率是表征电磁振荡特性的基本参量，测量频率也是电子测量的基本任务之一。目前广泛采用的频率测量方法主要有示波器测量法、电子计数器测量法、拍频和差频测量法。

一、示波器测量法

（一）扫速定度法

如果示波器的扫描范围开关具有时间定度（即给出示波管荧光屏上标尺线的每一横格与时间的关系，例如秒/格、毫秒/格、微秒/格），则可利用示波器显示出的被测信号波形，读出该信号的各种时间参数，如信号的周期等于荧光屏上波形一个周期的水平距离乘以扫描范围开关所在位置的时间/格。因为信号的频率是周期的倒数，所以可由已求得的周期计算出频率，即频率 = 1/周期。例如，荧光屏上被测信号波形一个周期的水平距离为四格，扫描范围开关所在位置的读数是 1 毫秒/格，则被测信号的频率 = 1/周期 = 1/(4 格 × 1 毫秒/格) = 250 赫(Hz)。为了提高扫速定度法测量频率的精度，应使荧光屏上显示的被测波形的周期数多一些，如果以 x 轴方向 10 格内占有几个周期来计算频率，算式如下： $f = \text{周期数}/(\text{时间/格} \times 10)$ 。

（二）李沙育图形法

任何一种示波器都可以用李沙育图形法对频率进行准确的测量。用李沙育图形法测量频率时按图 1.3 所示布置测量电路。将一个信号电压（设为被测频率的信号）接于示波器的 y 轴输入端，将另一个信号电压（设为已知频率的信号）接于示波器的 x 轴输入端（示波器的 x 轴选择开关置于衰减档而不能置于扫描档）。若被测频率是固定的，则已知频率应该是可调的。缓慢地调节已知频率，当两个信号的频率成整数倍时，荧光屏上便显示出稳定的李沙育图形。形成李沙育图形的图解如图 1.4 所示，图中两个信号的频率比为 $f_{\text{垂直}}:f_{\text{水平}} = 2:1$ 。图 1.5 列举了几个常用频率比的李沙育图形。

确定两个频率比的方法是：在水平方向作一直线与图形相切的点数为 $N_{\text{水平}}$ ，在垂直方向作一直线与图形相切的点数为 $N_{\text{垂直}}$ ，则 $f_{\text{垂直}}:f_{\text{水平}} = N_{\text{水平}}:N_{\text{垂直}}$ 。在确定切

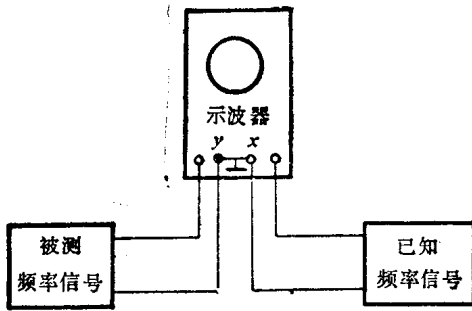


图 1.3 李沙育图形法测量频率电路图

$f_y : f_x$	1:1	1:2	1:3	2:3
李沙育图形				

图 1.5 几个常用频率比的李沙育图形

点数时应注意：与非闭合图形相切的点算作 1/2 点，如图 1.6(a) 所示。当两个信号相位差不同而频率比相同时，李沙育图形不同，见图 1.6(b) 和图 1.6(c)。

确定两个频率比的另一种方法是：在水平和垂直方向分别作与图形相交的直线，则 $f_{\text{垂直}} : f_{\text{水平}} = N_{\text{水平}} : N_{\text{垂直}}$ 。在确定交点数时，这两条线都不宜通过李沙育图形的任何一个交点，倘若直线通过李沙育图形的交点，则计算时交点处应算作 2 点。

显然，在实际测量工作中，用李沙育图形进行频率测量时，为了使测量简便正确，通常尽可能调节已知频率信号的频率，使荧光屏上显示的图形为园形。这时被测频率与已知频率相等。

此外，利用李沙育图形还可以求出两个相近频率之间的频率差。因为当两个频率近似相等时，屏上图形趋于椭圆，不过由于两者频率并不完全相等，因此图形不能稳定，每当较高频率的信号超过较低频率的信号一个整周期，便相当于两个相等频率之间的相位差发生一次由 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的变化(例如由 0° 时的斜线变成椭圆再变为 0° 时的斜线)。若借助秒表数出图形在每秒钟内周而复始的次数，便可测得该两信号频率之差值。

(三) 亮度调制法

在实际工作中，有时已知频率和被测频率之比相差很大，例如用已知频率 50Hz 去定度音频振荡器 1kHz 的频率，若用李沙育图形法进行测量，因两个频率之比相差太大，荧光屏上图形繁杂，切点(或交点)数不易观察清楚，这种情况宜采用亮度调制法。亮度调制法测量的频率比一般可达 25:1，甚至更高。

用亮度调制法进行频率测量时按图 1.7 所示布置测量电路。先将被测频率和已知频率中频率低的信号 f_1 (应为正弦波) 加到由电阻电容组成的 90° 相移网络上(一般

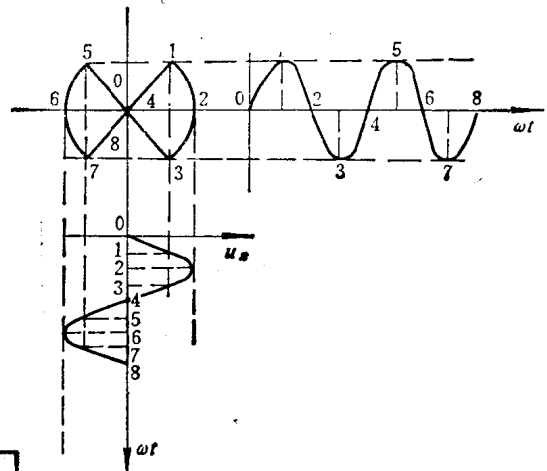


图 1.4 频率比 $f_y/f_x=2/1$ 时的李沙育图形

$\frac{1}{2} : \frac{3}{2} = 1:3$	$N_{\text{水平}} : N_{\text{垂直}} = f_y : f_x$	1:3	1:3
(a)			

图 1.6 频率比相同相位差不同的李沙育图形

情况下电阻可取 $1k\Omega$ 左右, 电容可取 $0.1\mu F$ 左右, 电阻和电容上电压的相位差为 90°), 将电阻上的信号接到示波器的 y 轴输入端, 将电容上的信号接到示波器的 x 轴输入端

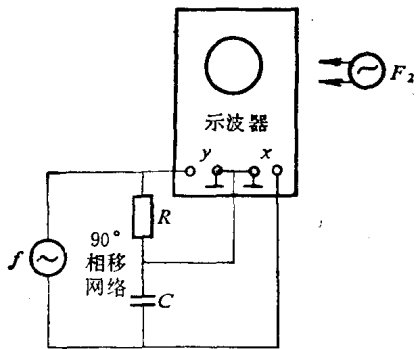


图 1.7 亮度调制法测量频率

因为 x 轴和 y 轴上分别输入频率相同而相位相差 90° 的两个信号, 所以只要适当调节示波器面板上的控制旋钮, 荧光屏上将显示一个大小适宜的正圆。再将频率较高的信号 f_2 (此信号电压至少应有 $4\sim 5V$, 大一些更好) 接到示波器的 z 轴输入 (z 轴输入插孔在示波器机后输入板上)。这时信号电压 f_2 对示波管阴极发射出来的电子束起调制作用。调节示波器辉度旋钮, 使波形辉度不宜太强。由于调制信号加在示波管阴极, 所以在信号电压 f_2 的正半周时, 示波管的电子束不能到达荧光屏, 负半周时才能到达荧光屏, 因此在荧光屏上出现断续的图形, 缓慢调节已知信号的频率, 当两个信号的频率成整数倍时, 荧光屏上便显示出稳定的断续图形, 圆周的分段数即为两频率之比。举例如下: 如果信号频率 f_1 为 $1000Hz$, 那就是说光点在一秒钟内要描画一千个圆, 亦即在 $1ms$ 内完成一个圆, 若调制信号频率 f_2 为 $4000Hz$, 亦即在 $1ms$ 内完成 4 个周期, 由于示波管内电子束在调制信号正半周时截止, 所以在 $1ms$ 内共截止 4 次, 这样荧光屏上显示的圆周将被截成 4 段圆弧, 即表示 f_2 与 f_1 之比为 4 比 1。

按照图 1.7 所示的电路进行测量时, 由于加在 y 轴和 x 轴的信号相位相差 90° , 所以荧光屏上显示一个正圆。但是必须要求信号 f_1 与示波器没有公共的接地端。如果 f_1 必须与示波器共地, 则可按图 1.8 所示连接电路, 此时荧光屏上显示的将不是一个正圆, 而是一个长轴倾斜的椭圆。

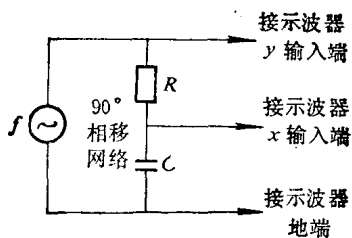


图 1.8 亮度调制法测量频率(共地接法)

二、电子计数器测量法

随着脉冲数字电路的发展, 用电子计数器测量频率日趋广泛。计数法就是用测量单位时间信号的周期数来确定信号的频率, 这种方法可以达到很高的测量准确度 (例如 $10^{-8}\sim 10^{-7}$)。

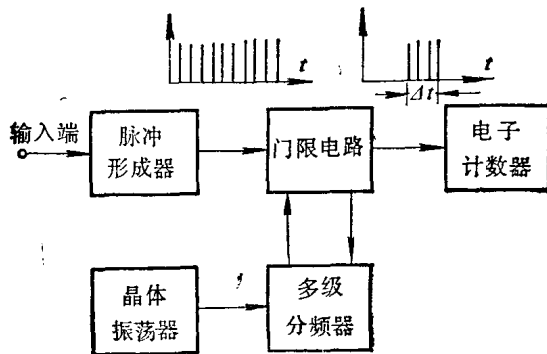


图 1.9 计数器测量频率原理图

电子计数器测量频率的基本原理方框图如图 1.9 所示。被测信号（不管是什么波形）经过脉冲形成电路转变成一个脉冲序列，每一周期对应一个脉冲，这种连续的脉冲序列到达控制的门限电路时，只有在门限打开的一定时间间隔内（例如 1s）到达的那些脉冲被它放过，并逐一加到电子计数器，由电子计数器数出它们的个数，在知道了多长时间通过了多少个脉冲后，即知道了被测信号的频率。这种测量方法的准确度，主要由控制门限打开的选定时间是否准确而定；此外，由于门限启开的时刻与首末两个脉冲到来的时刻不一定经常正好配合，这在计数结果中最多还会因此而可能有 ± 1 次计数误差（即差 1 个脉冲）。为了准确地控制门限打开的时间（即进行计数的时间），在频率计中通常用其内部的（也可改用加外的）晶振作为时间标准，并要求它的频率准确度和稳定度达到一次标准级的水平（即 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ ）。为了获得不同长度的标准时间间隔，将晶体振荡器的振荡频率分频至 1Hz 或 1/10Hz 等，这样便能得到各种标准振荡周期。测量时将某一种适合需要的标准振荡周期的起点和终点各形成一个脉冲加到门限电路作为它的“开启”和“关闭”信号，便能保证把门限打开的时间长度控制为所选定的准确已知数值。

这里的电子计数器部分通常是由 6~8 个十进位计数器串联而成。显示数字的方法是每个十进位安装一只数码显示管，以便可以显示由 0~9 之间的任一数字。这样计数结果的数值便可依次从各个十进位数码管所示的数字读出。

为了保证获得较高的测量精确度，在测量高低不同的频率时，在选择计数时间（即开门时间）长短上，应使计数结果尽可能用上电子计数器的全部十进位。例如，假若总共有 6 个十进位，当测量几百千赫的频率时，计数时间应选取 1s，而不应取 0.1s 或更短。

三、拍频和差频测量法

在具备可变已知标准频率的情况下，可采用拍频测量法测量音频范围内的信号频率或采用差频测量法测量高频范围内的信号频率。

（一）拍频测量法

当两个频率很接近的信号（ f_1 和 f_2 ）在线性元件上迭加时，将形成幅度在 $|u_1 - u_2|$ 到 $|u_1 + u_2|$ 的限度内不断变化、且幅度变化频率为 $f = |f_1 - f_2|$ 的合成信号，这种现象称为拍频（ u_1 和 u_2 分别为频率 f_1 和 f_2 的信号的幅度）。拍频现象的示意图如图 1.10 所示。其中图（a）、（b）分别表示频率为 f_1 和 f_2 的信号，图（c）表示信号 f_1 和 f_2 线性迭加后的合成图形。

当 f_1 和 f_2 处于音频范围，且其间的差值很小时，可利用耳机、电压表或示波器等指示器来监测拍频现象。图 1.11 所示系利用耳机作指示器的测试示意图。通过耳机听到如图 1.10（c）所示的合成信号的声音时，好象单频率的音调一样，只是它的响度按照差拍频率（ $f = |f_1 - f_2|$ ）周期性地变化。调节可变的已知（标准）频率，信号 f_1 与 f_2 愈接近相等，耳机中声音响度的涨落的次数愈少。由于人耳能察觉到几秒钟重复一次的声音涨落，因此实际上用拍频法可以将两个频率调到几乎完全相等，随即可以由已知（标准）频率的数值来决定被测频率的数值。拍频测量法的绝对准确度较高，可达到

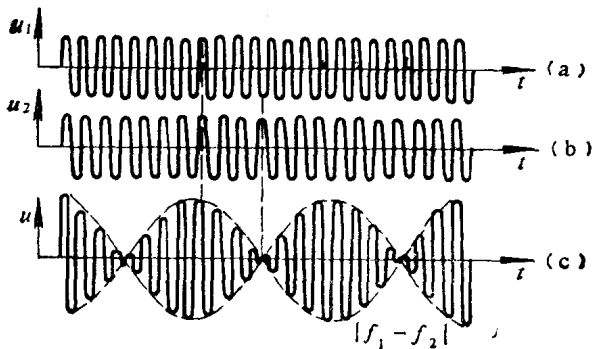


图 1.10 拍频的形成

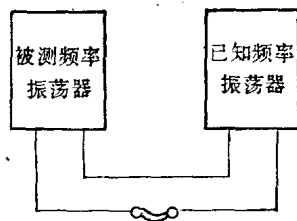


图 1.11 拍频法测量频率

零点几赫，如果拍频指示器采用电压表，则随着信号频率 f_1 与 f_2 愈接近相等，电压表指针的摆动越慢。如果拍频指示器采用示波器，则随着信号 f_1 与 f_2 愈接近相等，所显示的波形的起伏越小。

(二) 差频测量法

如果被测信号频率高于人耳能直接感觉的音频范围，则不能采用拍频测量，应采用如图 1.12 所示的差频测量法。在检波器的输出端一般接耳机，检波产生的差频 $|f_1 - f_2|$

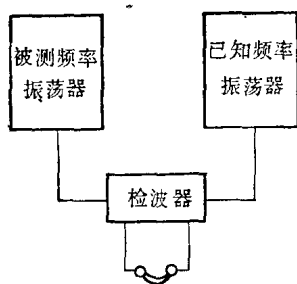


图 1.12 差频法测量频率

信号由耳机进行监测，如果调节已知(标准)频率，当 f_1 与 f_2 足够接近时，差频必将处于音频范围之内，根据耳机中差频音调的高低可以判断已知(标准)频率与被测频率的差别程度，如果耳机中的差频音调愈低，则已知(标准)频率与被测频率愈接近。因为人耳能听到的最低音调的频率不能低于 $10 \sim 20\text{Hz}$ 左右，所以当已知(标准)频率与被测频率相差小于 $10 \sim 20\text{Hz}$ 时，耳机中便听不到声音了，故此法中存在 $10 \sim 20\text{Hz}$ 的绝对误差。当然由于被测频率是高频，所以 $10 \sim 20\text{Hz}$ 引起的相对误差是很小的。

为了进一步提高零拍指示的准确度，可在检波之后接入普通的电表(交流或直流)，配合耳机进行监测。当差频降低到若干 Hz 以下时，一般电表的指针均能依照差频作摆动。当已知频率与被测频率相等时，指针便停止摆动而停留在零点，这时即可由已知(标准)频率的数值决定被测频率的数值。

按差频测量法原理构成的成品仪器有外差频率计。外差频率计是一种在高频范围内准确测量频率的重要仪器。

第三节 相位差的测量

在电路测试实践中，相位差测量(简称相位测量)的应用很广泛。例如，测量各种滤波器、移相器和放大器等双口网络的频率特性时，就需要对它们的输入信号与输出信号之间的相位差进行测量，也就是测量不同频率的正弦信号在通过双口网络时所产生的相位移。

相位差的测量方法主要有示波器测量法、比较测量法和直接读数法三种。

一、示波器测量法

在不具备专用的相位测量仪器的情况下，通常用示波器来进行相位差的测量。示波器测量法简便易行，适宜测量频率在 1MHz 以下的被测信号。能测量的最小相角可达 $5\sim 10^\circ$ ，而测量误差不超过 $5\sim 10\%$ 。

(一) 双线（双踪）示波法

在有双线或双踪示波器（或具备电子开关与单线示波器）的情况下，测量相位差时，可以采用直接显示波形的方法。

设有两个频率的正弦信号电压。

$$u_1 = V_{m1} \sin(\omega t + \phi_1)$$

$$u_2 = V_{m2} \sin(\omega t + \phi_2)$$

它们之间的相位差为

$$\Delta\phi = (\omega t + \phi_1) - (\omega t + \phi_2) = \phi_1 - \phi_2$$

上式中 ϕ_1 为电压 u_1 的初相， ϕ_2 为电压 u_2 的初相，由上式可知，两个同频率的正弦电压的相位差与时间无关。

将这两个被测的正弦信号分别输入到双线（或双踪）示波器的 y 轴输入端 y_I 和 y_{II} （如图 1.13 所示），此时示波器 x 轴的线性锯齿波电压同时对两个被测信号进行扫描，调节两条扫描线（即时间基线）使之重合，于是在示波器的荧光屏上就可以同时显示出两个信号的波形，如图 1.14 所示。扫描的触发信号宜选择 u_1 、 u_2 中相位超前的一个。

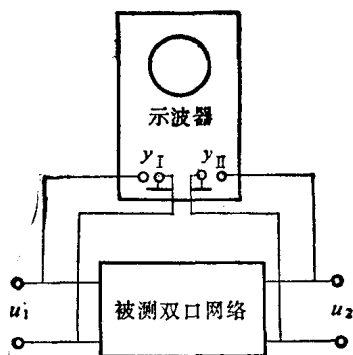


图 1.13 双线(踪)示波器测量相位差

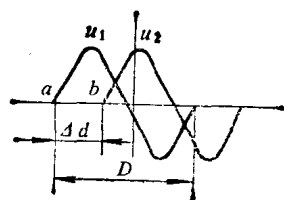


图 1.14 荧光屏上同时显示的两个信号波形

根据荧光屏上显示的 u_1 和 u_2 两个信号的波形，量出它们的一个周期在示波器时间基线上所占的格数 D （所对应的相位移为 360° ）和两个波形相应点在时间基线上间距的格数 Δd （对应于相位差 $\Delta\phi$ ），从而求得相位差

$$\Delta\phi = (\Delta d/D) \times 360^\circ$$

为了读数和计算的方便，测量时可以适当调节示波器面板上的相关旋钮，使荧光屏上显示的信号的一个周期恰好为 x 轴上坐标片刻度的 9 格（或 8 格），这样 x 轴上的刻度值