

面向 21 世纪全国高职高专电子电工类规划教材

电子测量技术与仪器

郑发泰 主 编

张鹏飞 叶华杰 副主编

周世官 刘 珺 参 编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书较为全面地介绍了电子测量技术的基本知识、电子测量仪器和测试系统的组成、一般测量过程以及电子测量仪器的维护。

全书共分 10 章。分别介绍了电子测量技术的内容、方法和特点, 测量误差的分类和数据处理方法, 信号发生器的分类和特点, 常用元器件的组成, 测量原理、方法及所采用的仪器, 常用模拟量的测量原理、方法及所采用的仪器, 数字量的测量原理、方法及所采用的仪器, 时域与频域测量仪器的分类、示波器的波形原理、频率特性测试仪的原理与分析方法, 逻辑分析仪的原理和应用, 智能仪器的组成、特点、一般测量过程, 自动测试系统的组成、特点和测试过程, 实验室抗噪声(干扰)常用技术、电子测量仪器校验与维修以及电子测量仪器的检修步骤与方法。

本书可作为高职高专或中等职业学校电子与信息类专业课程的教材, 也可用作电子测量技术与仪器的培训教材或工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术与仪器/郑发泰主编. —北京: 北京大学出版社, 2006.1
(面向 21 世纪全国高职高专电子电工类规划教材)
ISBN 7-301-09304-7

I. 电… II. 郑… III. 电子测量—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 069405 号

书 名: 电子测量技术与仪器

著作责任者: 郑发泰 主编

责任编辑: 胡伟晔 范晓

标准书号: ISBN 7-301-09304-7/TM • 0005

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765126

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电子信箱: xxjs@pup.pku.edu.cn

印刷者:

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×980 毫米 16 开本 10.5 印张 226 字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 18.00 元

前 言

本书是高等职业教育面向 21 世纪全国高职高专电子电工类系列教材之一，在教材的编写过程中得到了北京大学出版社的领导与编辑们的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢。

“电子测量技术与仪器”是高职高专和中等职业技术学校电子技术专业的重要课程。通过该课程的学习，学生能够全面地了解电子测量技术、电子测量仪器以及测试系统的专业知识，系统地学习和掌握电子测量仪器和测试系统的应用，为今后的学习和工作打下良好的基础。

本教材的参考教学时间为 64 学时，主要内容包括电子测量技术的基础知识、电子测量仪器及系统的工作原理与应用。全书共分 10 章：第 1 章绪论，介绍了电子测量技术的内容、方法与特点，电子测量仪器的分类和应用。第 2 章测量误差分析与结果处理，介绍了测量误差的分类和数据处理方法。第 3 章电子测量常用信号发生器，介绍了信号发生器的分类和特点，并重点介绍了正弦信号发生器和函数信号发生器、射频信号发生器。第 4 章常用元器件的测量及仪器，介绍了常用元器件的组成、测量原理和方法以及所采用的仪器。第 5 章模拟量的测量及仪器，介绍了模拟量的测量原理和方法以及所采用的仪器。第 6 章数字量的测量及仪器，介绍了数字量的测量原理和方法以及所采用的仪器。第 7 章时域与频域的测量及仪器，介绍了频域测量仪器的分类、示波器的波形原理、频率特性测试仪的原理与分析方法。第 8 章逻辑电路的测量与仪器，介绍了逻辑分析仪的原理和应用。第 9 章智能仪器与自动测试系统，介绍了智能仪器的组成、特点、一般测量过程，以及自动测试系统的组成、特点和测试过程。第 10 章测量仪器的维护，介绍了实验室抗噪声（干扰）常用技术、电子测量仪器校验与维修、电子测量仪器的检修步骤与方法。书中带“※”号的章节为选学内容。

本书在进行编写的过程中认真研究了现阶段学生的知识体系和能力内涵，正确认识应用型人才培养的知识与能力结构，注重培养学生掌握必备的基本理论、专门知识和实际工作的基本技能，把握理论以够用为度，知识、技能和方法以理解、掌握、初步运用为度的编写原则。同时，本书在内容上关注新技术的发展和应用，选编了智能仪器和自动测试系统、增加了测量仪器的维护等内容。

本教材由浙江工商职业技术学院郑发泰担任主编，编写了第 1、第 9 章，并负责全书的统稿工作。浙江工商职业技术学院张鹏飞、叶华杰担任副主编，其中张鹏飞还编写了第 2、第 3、第 8 章，叶华杰编写了第 4、第 5 章。宁波工程学院周世官编写了第 6、第 10 章，宁

波职业技术学院刘珺编写了第 7 章。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者给予批评指正。

编 者

2005 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测量的基本概念	1
1.2 电子测量的方法与特点	2
1.2.1 电子测量的方法	2
1.2.2 电子测量的特点	3
1.3 电子测量的内容	4
1.4 电子测量仪器的分类和应用	5
1.5 测量技术及仪器的发展趋势	5
1.6 小结	6
1.7 思考题	6
第 2 章 测量误差分析与结果处理	7
2.1 常用测量术语简介	7
2.2 测量误差的表示方法及估算	9
2.2.1 测量误差的来源	9
2.2.2 测量误差的分类	9
2.2.3 测量误差的估算	12
2.2.4 测量结果的评定	13
2.3 测量误差的分析	14
2.3.1 系统误差的分析	14
2.3.2 随机误差的分析	16
2.3.3 粗大误差的分析	17
2.4 仪器选择的一般原则	19
2.4.1 仪表量程的合理原则	19
2.4.2 仪表等级的合理选择	19
2.5 误差数据的处理方法	19
2.5.1 有效数字的概念	20
2.5.2 有效数字的处理	20
2.6 小结	22
2.7 思考题	22

第3章 电子测量常用信号发生器	24
3.1 概述	24
3.2 正弦信号发生器	24
3.2.1 正弦信号发生器的分类和基本组成	24
3.2.2 低频信号发生器	25
3.2.3 高频信号发生器	28
3.3 函数信号发生器	30
3.3.1 函数发生器的分类	30
3.3.2 其他类型的函数发生器	32
3.3.3 函数发生器的性能和应用	32
3.4 脉冲信号发生器	33
3.4.1 脉冲信号发生器的特点和分类	33
3.4.2 脉冲信号发生器的工作原理	34
3.5 频率合成信号发生器	35
3.5.1 频率合成信号发生器的组成	35
3.5.2 频率合成器的原理	36
3.5.3 频率合成信号发生器的主要技术指标	39
3.6 小结	40
3.7 思考题	41
第4章 常用元器件的测量与仪器	42
4.1 概述	42
4.2 电阻的测量	42
4.2.1 电阻的参数	42
4.2.2 电阻的测量	43
4.3 电容的测量	45
4.3.1 电容的参数和标注方法	46
4.3.2 电容的测量方法	47
4.4 电感的测量	49
4.4.1 电感的主要参数	50
4.4.2 电感量的测试	50
4.4.3 交流电桥法测量电感	51
4.4.4 万用表对电感器好坏的测试	52
4.5 半导体二极管的测量	53
4.5.1 半导体二极管的特性和主要参数	53
4.5.2 半导体二极管的测量	53

4.6	半导体三极管的测量	55
4.6.1	三极管的主要参数	55
4.6.2	三极管的测量	56
4.7	小结	58
4.8	思考题	58
第5章	模拟量的测量及仪器	59
5.1	概述	59
5.2	直流电流的测量	59
5.2.1	直流电流测量的一般方法	59
5.2.2	模拟直流电流表的工作原理	59
5.2.3	数字式万用表测量直流电流的原理	61
5.2.4	直流电流的测量方法	62
5.3	交流电流的测量	63
5.3.1	交流电流测量的一般方法	63
5.3.2	模拟交流电流表的工作原理	64
5.3.3	热电式电流表	65
5.4	电压的测量	67
5.4.1	模拟式电压表	67
5.4.2	电压测量的应用	68
5.5	分贝的测量	71
5.5.1	数学定义	71
5.5.2	分贝值的测量	73
5.6	功率的测量	74
5.6.1	音频与较高频信号功率的测量	74
5.6.2	误差分析	77
5.6.3	功率表实例——射频功率表	77
*5.7	噪声电压的测量	78
5.7.1	噪声的基本特性	78
5.7.2	器件和放大器噪声的测量	79
*5.8	失真度的测量	84
5.8.1	非线性失真的定义	85
5.8.2	失真度测量仪举例	85
5.9	小结	89
5.10	思考题	89
第6章	数字量的测量及仪器	90

6.1	概述.....	90
6.2	电压的测量.....	90
6.2.1	电压测量的基本要求.....	90
6.2.2	数字电压表的组成原理及主要性能指标.....	91
6.2.3	数字电压表.....	92
6.3	频率的测量.....	93
6.3.1	频率测量.....	93
6.3.2	用电子计数法测量频率.....	94
6.3.3	电子计数器测量频率比.....	96
6.3.4	频率测量范围的扩展.....	97
6.3.5	电子计数器（实例）.....	97
6.4	时间的测量.....	99
6.4.1	周期的测量.....	99
6.4.2	长时间的测量.....	99
6.5	相位的测量.....	100
6.5.1	脉冲计数法测相位.....	100
6.5.2	数字相位计（实例）.....	101
6.6	小结.....	103
6.7	思考题.....	104
第7章	时域与频域的测量及仪器.....	105
7.1	概述.....	105
7.2	通用示波器.....	105
7.2.1	波形显示与技术指标.....	106
7.2.2	Y通道（垂直系统）.....	111
7.2.3	X通道（水平系统）.....	111
7.3	专用示波器.....	112
7.3.1	取样示波器.....	112
7.3.2	记忆示波器.....	113
7.3.3	数字存储示波器.....	114
7.4	频率特性测试仪.....	115
7.4.1	测量原理.....	115
7.4.2	使用方法.....	118
7.5	晶体管特性图示仪.....	120
7.5.1	工作原理及基本组成.....	120
7.5.2	使用方法.....	122

7.6	频谱分析仪.....	122
7.6.1	工作原理.....	123
7.6.2	主要参数.....	124
7.7	小结.....	125
7.8	思考题.....	125
第8章	逻辑电路的测量与仪器.....	126
8.1	概述.....	126
8.1.1	数据域测试技术.....	126
8.1.2	逻辑电路测试系统.....	127
8.2	简单的逻辑分析方法.....	129
8.2.1	逻辑笔的基本组成.....	130
8.2.2	逻辑笔的应用.....	130
8.3	逻辑分析仪.....	131
8.3.1	逻辑分析仪的主要特点.....	131
8.3.2	逻辑分析仪的分类.....	131
8.3.3	逻辑分析仪的基本组成.....	132
8.3.4	逻辑分析仪的基本工作原理.....	132
8.3.5	数据流的存储.....	133
8.3.6	时钟.....	134
8.3.7	逻辑分析仪的显示方式.....	134
8.3.8	逻辑分析仪的主要技术指标.....	135
8.3.9	逻辑分析仪与传统示波器的比较.....	135
8.4	小结.....	136
8.5	思考题.....	136
第9章	智能仪器与自动测试系统.....	137
9.1	概述.....	137
9.2	智能仪器.....	138
9.2.1	智能仪器的概念.....	138
9.2.2	智能仪器的特点.....	138
9.2.3	智能仪器的基本组成.....	139
9.2.4	智能仪器的一般测量过程.....	140
9.3	自动测试系统.....	141
9.3.1	组建自动测试系统的原则.....	141
9.3.2	组建自动测试系统的方法.....	141
9.3.3	自动测试系统的测试过程.....	142

9.4 虚拟仪器和网络化仪器	142
9.4.1 虚拟仪器	142
9.4.2 网络化仪器	144
9.5 小结	145
9.6 思考题	146
第 10 章 测量仪器的维护	147
10.1 概述	147
10.2 实验室抗噪声技术	147
10.2.1 实验室干扰的来源	148
10.2.2 实验室抗干扰技术	149
10.3 仪器的维护与故障诊断	149
10.3.1 电子测量仪器的维护	149
10.3.2 电子测量仪器的维修与故障诊断	152
10.4 小结	154
10.5 思考题	154
参考文献	155

第2章 测量误差分析与结果处理

2.1 常用测量术语简介

1. 一次测量和多次测量

一次测量是对一个被测量的量只进行一次测量的过程。**多次测量**是对一个被测量进行不止一次的测量。多次测量可以观察测量结果的一致性，可以反映测量结果的精确度。一般情况下，要求高的精密测量都应进行多次测量，如对仪器的校准等。

2. 等精度测量和非等精度测量

(1) 等精度测量

等精度测量是指保持测量条件不变而进行的多次测量。等精度测量的每一次测量都有同样的可靠性，也就是每一次测量结果的精度都是相等的。其测量步骤如下：

① 利用修正值等方法对测得结果进行修正，将已减弱恒定系统误差影响的各数据，按先后顺序列出表格。

② 求出测量结果的算术平均值。

③ 用贝塞尔公式计算标准偏差估计值。

④ 利用莱特准则检查数据有无坏值，如果有坏值，那么剔除对应的一个坏值后重新开始计算，直到没有坏值出现为止，每次只能剔除一个坏值。

⑤ 利用马利科夫准则、阿卑—赫梅特准则或作图等方法检查数据中是否有不可忽略的系统误差。如果有不可忽略的系统误差，那么测量结果不能应用，而应查明原因，并在消除系统误差之后重新测量。

⑥ 计算算术平均值的标准偏差。

⑦ 写出测量结果的最后表达式。

前面讨论的是等精度测量，即在相同条件下短时间重复的测量。在实际测量中测量条件可能改变，这时的测量就称为非等精度测量。

(2) 非等精度测量

非等精度测量与等精度测量相对应，是指在测量条件不能维持不变的情况下的多次测量，其测量结果的可靠性程度是不一样的。下面是非等精度测量的两个主要参数。

① 权的概念

权是指常数 λ 与测量值算术平均值的标准差之比。

在不同的条件下，测量数据的精度是不同的，由于非等精度测量偏差估计值不同，所以可靠程度不同。精度高，可靠性大，“权”就大；反之，权就小。

② 加权

处理非等精度测量不仅要考虑测量数据本身，还必须考虑它的权。通常把测量值和它的权结合在一起考虑，称为**加权**。

3. 真值与最佳值

真值是指被测量本身具有的真实值，一般用 A_0 表示。然而在实际测量过程中，由于人们认识的局限性、测量手段的不完善及测量工具的不准确等因素的影响，真值一般是不可知的。

理想情况下，在排除系统误差的前提下，当测量的次数趋近于无穷时，被测量的算术平均值称为该值的数学期望，数学期望即为真值 A_0 。但是测量次数是有限的，因此满足一定测量精度的、有限次测量的算术平均值就是**最佳值**，用 A 表示。

4. 示值

示值也称为测量值，是指测量器具的读数装置所指示出来的被测量的数值，一般用 x 表示。

5. 误差

误差就是测得值与测量真值之差。误差的来源包括测量理论和方法、仪器、环境及人为 4 个方面。

6. 测量误差

测量误差是测量结果与被测真值的差异，通常可以分为绝对误差和相对误差两种。

7. 测量准确度

测量准确度是指测量结果与真值之间一致的程度。准确度是一种定性概念，而非定量概念。描述准确度采用准确度等级，一次成功的测量应是准确度较高的测量。

8. 测量精度

测量精度是对测量值重复性程度的描述。一般来说，不存在没有误差的测量结果，也不存在没有精度要求的测试系统，所有测量对测量值都有精度要求。

2.2 测量误差的表示方法及估算

2.2.1 测量误差的来源

测量的目的就是通过实验获得所需的测量值。在测量过程中产生误差是普遍存在的,因为对客观规律认识的局限性、测量仪器不准确、测量手段不完善、测量条件的变化及测量过程中的误操作等种种因素,都会引起测量误差。研究测量误差的来源及其规律性,从而减少或最终消除误差对得到准确的实验结果至关重要。

测量误差的来源主要有以下4种。

(1) 仪器误差。**仪器误差**是由于测量过程中所使用的仪器本身及其辅助器件精度不够或性能不够完善造成的测量误差。例如,用刻度模糊不清的500型万用表来测量电路电压引起的误差就是仪器误差。在测量过程中,仪器误差往往是主要的。

(2) 理论误差与方法误差。**理论误差**是由于测量过程中所依据的理论不够严密或采用了不适当的简化,用近似公式计算测量结果时所产生的误差。**方法误差**是由于测量方法不合理所产生的误差。例如,用低输入阻抗的普通电压表测量高阻抗回路的电压,这种由于负载不匹配而引起的误差就是方法误差。

(3) 环境影响误差。**环境影响误差**是由于各种环境因素与要求的条件不一致所造成的误差。例如,测量过程中,由于温度、湿度以及电源电压等因素影响所造成的误差。

(4) 人为误差。**人为误差**是由于测量者本身的素质在测量中所造成的误差。例如,在测量过程中,测量者的反应速度、分辨能力、视觉疲劳和固有习惯等因素所引起的误差。

在测量过程中,为了获得准确的测量结果,必须提高仪器精度、改善测量方法、减小环境影响并提高测量者的自身素质。

2.2.2 测量误差的分类

使用任何量具或仪器进行测量时总存在着误差。测量误差的分类如下。

1. 按照表示方法的不同分类

测量误差按表示方法可以分为绝对误差、相对误差和容许误差3种。

(1) 绝对误差

绝对误差是测量值与真值之差,绝对误差的表示方法为:

$$\Delta x = x - A_0$$

式中, Δx ——绝对误差;

x ——被测量的实测值;

A_0 ——被测量的真值。

由于真值 A_0 是理想值, 是不可知的, 所以在实际应用时, 常用精度高一级的标准器具的示值或最佳值作为实际值来代替真值, 这时绝对误差表示为:

$$\Delta x = x - A$$

式中, Δx ——绝对误差;

x ——被测量的实测值;

A ——被测量的实际值。

绝对误差虽然可以反映测量误差的大小和方向, 但不能说明测量的准确程度, 因此又引入了相对误差的概念。

(2) 相对误差

相对误差是绝对误差与平均值之比值, 常用百分数来表示。在实际使用时, 相对误差有几种不同的表示形式: 实际相对误差(绝对误差与被测量实际值的比值)、示值相对误差(绝对误差与被测量的读测值的比值)和满度相对误差(量程的最大绝对误差与满度量程的比值)。相对误差可用下列公式来表示:

$$r = \frac{\text{测量值} - \text{实际值}}{\text{实际值}} \times 100\%$$

$$\text{实际相对误差: } r_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\%,$$

$$\text{示值相对误差: } r_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%,$$

$$\text{满度相对误差: } r_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\%,$$

式中, r_A ——实际相对误差;

Δx ——绝对误差;

A ——被测量的实际值;

r_x ——示值相对误差;

x ——被测量的读测值;

Δx_m ——该量程最大绝对误差;

x_m ——满度量值。

(3) 容许误差

容许误差是指测量仪器在规定的使用条件下可能产生的最大误差范围。容许误差有时也被称作仪器误差, 它是衡量电子测量仪器质量的最重要的指标。容许误差的表示方法既可以用绝对误差表示, 也可以用各种相对误差表示, 或者用两者结合起来表示。在指针式仪表中, 容许误差就是满度相对误差。

容许误差是指某一类仪器不应超出的误差最大范围, 并不是指某一台确定仪器的实际误差。假如有几台合格的毫伏表, 技术说明书给出的容许误差是 $\pm 2\%$, 则只能说明这几台

毫伏表的容许误差范围为 $\pm 2\%$ ，并不能由此判断其中每一台仪器的真实误差。

一般电子测量仪器的容许误差有4种：工作误差、固有误差、影响误差以及稳定误差。

① **工作误差**是在额定工作条件下仪器误差的极限值，即来自仪器外部的各种影响量和仪器内部的影响特性为任意可能的组合时，仪器误差的最大极限值。这种表示方法的优点是使用起来非常方便，使用者可以利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围。缺点是工作误差是在最不利的组合条件下给出的，而实际使用中构成最不利组合的可能性很小。因此，用仪器的工作误差来估计测量结果的误差会偏大。

② **固有误差**是当仪器的各种影响量和影响特性处于基准条件时，仪器所具有的误差。这些基准条件是比较严格的，所以这种误差能够更准确地反映仪器所固有的性能，便于在相同条件下，对同类仪器进行比较和校准。

③ **影响误差**是当一个影响量在其额定使用范围内（或一个影响特性在其有效范围内）取任意值，而其他影响量和影响特性均为处于基准条件时所测得的误差。例如温度误差、频率误差等。只有当某一影响量在工作误差中起重要作用时才给出，它是一种误差的极限。

④ **稳定误差**是仪器的标称值在其他影响量和影响特性保持恒定的情况下，于规定时间内产生的误差极限。习惯上以相对误差形式给出并注明最长连续工作时间。

使用者可能还会遇到以前规定的电子仪器的误差表示方法，如基本误差和附加误差。**基本误差**就是固有误差，只是基准条件宽一些。附加误差类似于影响误差，但又不完全与影响误差相同。**附加误差**是指规定工作条件中的一项或几项发生变化时，仪器产生的附加误差。所谓规定工作条件的变化，可以是使用条件发生变化，也可以是被测对象参数发生变化。

2. 根据测量误差的性质和特点分类

通常把测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) **系统误差**。**系统误差**是指在相同条件下，即测量条件不变或某些条件按一定规律变化，多次重复测量同一量值时，误差的绝对值和符号保持恒定；或者某一条件改变时，误差按某种规律变化。系统误差又称为恒定系统误差，简称恒差。造成系统误差的因素很多，但都具有一定的规律性，在实际测量中可以分析系统误差产生的原因，采取一定的技术措施，消除或减弱系统误差。

(2) **随机误差**。**随机误差**是指在相同条件下，多次测量同一量值时，误差的大小和符号以不可预定的方式变化着的误差。随机误差又称为偶然误差。根据数理统计的有关原理和大量测量实践证明，很多测量结果的随机误差的分布形式接近正态分布，也有部分测量结果的随机误差属于均匀分布或其他分布。研究随机误差的方法主要是概率统计法。

(3) **粗大误差**。**粗大误差**是由于测量过程中的错误操作（如读数错误、测量方法错误、操作不当以及测量仪器设备本身存在的问题）造成的。粗大误差又称为疏忽误差。粗大误

差明显地歪曲了真值，通常如果测量结果中带有粗大误差时，应按一定规则把它剔除。

2.2.3 测量误差的估算

测量误差的大小是衡量测量结果准确度高的重要参数，也是评价测量结果的重要参考依据。因此，在给出测量结果的同时给出误差范围是十分必要的。

1. 直接测量误差的估算

如果测量时所用的仪器仪表是以量程的百分数表示准确度的，那么测量误差用以下公式求出：

$$\Delta_A = \pm \alpha A_m \%$$

$$r_A = \pm \frac{A_m}{A_x} \alpha \%$$

式中， Δ_A ， r_A ——分别为测量结果的绝对误差和相对误差；

α ， A_m ——分别为仪器仪表的准确度等级和量程；

A_x ——测量结果。

如果测量时所用的仪器仪表的基本误差或允许误差已知，则测量误差用以下公式求出。

$$\Delta_A = \Delta$$

$$r_A = \left(\frac{\Delta}{A_x} \right) \times 100 \%$$

式中， Δ ——仪器仪表的基本误差或容许误差。

如果进行了多次测量，那么还应考虑随机误差的影响。若多次测量的标准偏差的估计值为 σ ，则测量误差公式为

$$\Delta_A = \pm (\sigma A_m \% + K_0)$$

$$\Delta_A = \pm (|\Delta| + K_0)$$

式中， K_0 ——置信因子。

2. 间接测量误差的估算

设测量结果 y 是 n 个独立变量 A_1, A_2, \dots, A_n 的函数，即

$$y = f(A_1, A_2, \dots, A_n)$$

假如各独立变量所产生的绝对误差分量为 Δ_{Fi} ，相对误差分量分别为 r_{Fi} ，则由这些误差分量综合影响而产生的函数总误差等于各误差分量的代数和，即

$$\Delta_y = \sum \Delta_{Fi}$$

$$r_y = \sum r_{Fi}$$

式中, Δ_y , r_y ——函数的绝对总误差和相对总误差;

$\Delta_{Fi} = C_{\Delta} \Delta_A$ —— C_{Δ} 为绝对误差传递系数, Δ_A 为独立变量 A_i 的绝对误差;

$r_{Fi} = C_r r_A$ —— C_r 相对误差传递系数, r_A 为独立变量 A_i 的相对误差。

2.2.4 测量结果的评定

测量结果是否满足要求可以对正确度、精密度和准确度3个方面进行评定。

1. 正确度

在相同条件下, 对某一定值做多次测量所得结果的数学期望(或均值)与被测量的真值之差, 称为测量的**正确度**, 用下列公式表示。

$$\varepsilon = \bar{x} - A_0$$

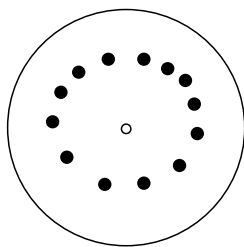
式中, A_0 ——被测量的真值;

\bar{x} ——测量结果的数学期望或均值。

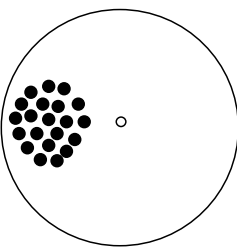
正确度表示测量结果中系统误差的大小程度。由于可以采用多次测量取平均值的方法消除随机误差的影响, 因此系统误差越小, 就可能使测量结果越正确, 所以正确度可用来表征系统误差大小的程度。系统误差越大, 正确度越低; 系统误差越小, 正确度越高。

2. 精密度

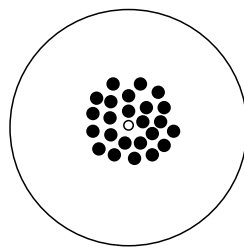
在相同的条件下, 对某定值做多次测量, 测量值分散的程度被称为**精密度**。精密度表示测量结果中随机误差的大小程度, 简称精度。随机误差的大小可用测量值的标准偏差来衡量。标准偏差越小, 测量值越集中, 测量的精密度越高; 反之, 标准偏差越大, 测量值越分散, 测量精密度越低。图2-1所示为正确度和精密度的比较。



(a) 正确度高、精密度低



(b) 正确度低、精密度高



(c) 正确度高、精密度高

图 2-1 测量结果评价图

3. 准确度

准确度表示正确度和精密度的综合程度。准确度是测量结果系统误差与随机误差的综合，表示测量结果与真值的一致程度。在一定的测量条件下，总是力求测量结果尽量接近真值，也就是力求准确度高。

图 2-1 中每个圆表示结果分布的最大范围，空心点圆心表示测量值的真值，实心黑点为每次测量的测量值，多点为多次测量。图 2-1 (a) 显示数据的平均值与真值相差不多，但数据分散，说明正确度高而精密度低；图 2-1 (b) 显示数据的平均值与真值相差较大，但数据集中，说明数据的精密度高而正确度低；图 2-1 (c) 显示数据的平均值与真值相差不多，而且数据集中，说明测量结果的正确度、精密度都很高，即测量准确度高。

由于在测量过程中任何一次测量结果都可能含有系统误差和随机误差，因此仅使用正确度和精密度来衡量是不完全的。如图 2-1 所示，测量结果中精密度高的，不一定正确度高；同样，正确度高的，不一定精密度高。只有准确度才能对测量结果进行较准确的评价。

2.3 测量误差的分析

测量误差的分析主要是对系统误差、随机误差和粗大误差 3 种误差进行判断和处理，不同的误差采用不同的处理方法。

2.3.1 系统误差的分析

系统误差产生的原因很多，但主要是仪器误差、环境误差、方法误差和理论误差。在一定的测量条件下，系统误差的变化规律是可以掌握的。但是在实际测量中对系统误差较难处理，这是由于在不同测量条件下，系统误差的规律及数值有其特殊性，很难给出一个普遍适用的处理方法，而且一般不能用数理统计的方法减小其对测量结果的影响。

1. 系统误差的特点

- (1) 系统误差是一个恒定不变的值或是确定的函数值。
- (2) 多次重复测量，不能消除或减少系统误差。
- (3) 系统误差具有可控制性和修正性。

2. 识别系统误差的方法

测量结果是否含有系统误差，可根据系统误差的特点来判断。常用的方法有以下几种：

(1) 理论分析法。凡属测量方法或测量原理引起的误差, 只要对测量方法和测量原理进行定量分析, 就可以得到误差的大小。

(2) 校准和对比法。当怀疑测量结果可能有系统误差时, 可用准确度更高的测量仪器进行重复测量以发现误差。

(3) 改变测量条件法。多数情况下, 系统误差为恒差。改变测量条件, 如改变测量者、测量方法和测量环境等条件, 然后将测量条件改变前后的数据进行比较, 若改变后出现另一确定的恒差, 即可判断存在系统误差。

(4) 剩余误差观察法。剩余误差是指任意一次测量值与算术平均值 \bar{x} 之差, 用 V_i 表示。剩余误差观察法就是将各个剩余误差制成表格或曲线, 以此来判断有无系统误差。为了直观起见, 通常将剩余误差画成曲线。

(5) 公式判断法。通常有马利科夫准则和阿卑—赫梅特准则, 可分别用来判定有无累积性系统误差和周期性系统误差。

3. 消除或削弱系统误差的方法

在测量之前注意分析和避免产生系统误差的来源, 或设法阻止受到误差来源的影响, 是减小系统误差最好、最根本的方法。该法虽然可以减少系统误差, 但仍然很难消除产生系统误差的全部因素。因此, 在测量过程中, 可以采用一些专门的测量方法和测量技术, 以消除或削弱系统误差。这些方法和技术就是比较测量技术, 常用的典型方法有如下几种:

(1) 零示法。在测量中, 将被测量与标准量进行比较。如果两者相等, 则指示器指示为零, 由此求得被测量。值测量电路如图 2-2 所示。 U_x 是被测电压, E 是标准直流电源, R_1 和 R_2 组成标准可调分压器, P 为指示器, $U = \frac{ER_2}{R_1 + R_2}$ 。测量时, 调节分压比, 使 A 、 B 的电位相等, P 指示 0, 则 $U_x = U = \frac{ER_2}{R_1 + R_2}$ 。

在测量过程中, 获得 U_0 值时指示器示零, 指示器不取电流, 对分压比没有影响。因此, 只要标准电源电压准确度高、指示器灵敏度高, 用零示法测量电压, 就可以获得较高的准确度。因而零示法广泛用于阻抗测量 (各种电桥)、电压测量 (电差计)、频率测量 (拍频法、差频法等) 以及其他参量测量中。

零示法在测量过程中要不断调节分压比, 改变标准量, 最后被测量等于标准量, 指示器示零测量结束。调节过程较慢, 需要仔细观察。特别是在实际测量中, 标准量不一定是连续可调的, 这样可能给测量带来误差。

(2) 微差法。这是一种差值比较, 当标准量 s 不足以抵消未知量 x 的作用时, 两者存在一个微差, $\delta = x - s$, 测量这种微差的方法称为微差法。

微差法电路如图 2-3 所示, x 为被测量, s 为标准量, δ 为指示器示值。

$$x = s + \delta$$

$$\text{测量误差为: } \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta s}{x} + \frac{\delta}{x} \times \frac{\Delta \delta}{\delta}$$

式中, s , Δs ——标准量, 标准量的绝对误差;

δ , $\Delta \delta$ ——被测量与标准量的微差, 微差的绝对误差;

x , Δx ——被测量值, 被测量值的绝对误差。

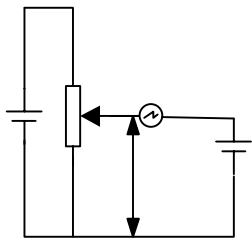


图 2-2 零示法

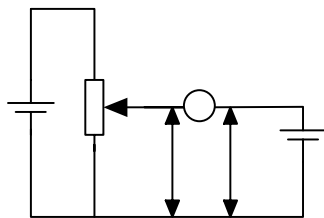


图 2-3 微差法

(3) 替代法。替代法是用与被测量相同大小的已知量去代替测量装置中的被测量, 在测量条件不变的情况下, 使测量装置的指示读数不变, 这时被测量的值就等于这个标准量的值。替代法测量的准确度主要取决于标准量的准确度和指示器的灵敏度。

(4) 交换法。在测量过程中, 测量结果出现单一方向的系统误差时, 可以进行两次测量, 利用交换被测量在测量系统中的位置或测量方向等方法, 使误差的方向相反, 然后对两次测量的结果取平均值, 从而大大减小系统误差的影响。

2.3.2 随机误差的分析

1. 随机误差产生的原因

等精度测量同一量时, 误差的绝对值和符号均以不可预定的方式无规则变化的误差称为随机误差。随机误差是不可预测和不可避免的, 是许多因素造成的很多微小误差的总和。如测量仪器元器件产生噪声带来的误差以及电源电压波动带来的误差等。

2. 随机误差的特点

- (1) 在多次测量中, 绝对值小的误差出现的次数比绝对值大的误差出现的次数多。
- (2) 在多次测量中, 绝对值相等的正误差与负误差出现的概率相同, 即具有对称性。
- (3) 测量次数一定时, 误差的绝对值不会超过一定的界限, 即具有有界性。
- (4) 进行等精度测量时, 随机误差的算术平均值的误差随着测量次数的增加而趋近于

零，即正负误差具有抵偿性。

3. 随机误差的粗略计算

由于随机误差具有不可预测和不可避免性，所以当测量次数 n 趋于无穷大时，随机误差就趋于零。实际测量中我们只能做到测量次数尽可能多，贝赛尔公式是用来计算有限次测量数据标准差的方法。

贝赛尔公式定义：当 n 为有限次时，可以用剩余误差来计算标准差的估计值 $\hat{\sigma}$ 。

剩余误差为各次测量的测得值与算术平均值之差，即：

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

式中， v_i ——剩余误差；

x_i ——测量值；

\bar{x} ——测量值的算术平均值。

标准差的估计值的计算公式为：

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中， $\hat{\sigma}$ ——标准差的估计值；

v_i ——剩余误差；

x_i ——测量值；

\bar{x} ——测量值的算术平均值；

n ——测量次数。

4. 随机误差的处理原则

由于随机误差具有抵偿性，理论上当测量次数 n 趋于无限大时，随机误差趋于零，但是实际上不可能做到无限多次的测量。从上述分析可知，当基本消除系统误差又剔除粗大误差后，虽然仍有随机误差存在，但多次测量值的算术平均值已很接近被测量的真值，因此，只要选择合适的测量次数，并使测量精度满足要求，就可将算术平均值作为最后的测量结果。

2.3.3 粗大误差的分析

1. 粗大误差产生的原因

粗大误差又称疏失误差或粗差，是在一定的测量条件下，由于读数错误、记录错误、操作不正确以及测量条件的意外改变等因素造成测量值明显偏离实际值，而产生的误差。由于粗大误差明显歪曲测量结果，因此称这种测量值为可疑数据或坏值，应予以剔除。只

有在消除粗大误差后才能进行测量。

2. 粗大误差的判别准则

含有粗大误差的测量值称为坏值，判别是否是坏值的准则有以下三个：

(1) 莱特准则。若第*i*次测量值 x_i 满足 $|x_i - \bar{x}| > 3\hat{\sigma}(x)$ ，则 x_i 是坏值。它适合于正态分布且测量次数较多的情况。如果测量次数较少，不属于正态分布的测量结果，就不用此准则。

(2) 格拉布斯准则。若 $|x_i - \bar{x}| > G\hat{\sigma}(x)$ ，则 x_i 是坏值，式中 *G* 为格拉布斯准则系数，可由表 2-1 查得。

表 2-1 格拉布斯准则系数

测量次数 <i>n</i>	<i>G</i>		测量次数 <i>n</i>	<i>G</i>	
	<i>p</i> =0.95	<i>p</i> =0.99		<i>p</i> =0.95	<i>p</i> =0.99
3	1.15	1.15	12	2.29	2.55
4	1.46	1.49	13	2.33	2.61
5	1.67	1.75	14	2.37	2.66
6	1.82	1.94	15	2.41	2.70
7	1.94	2.10	16	2.44	2.74
8	2.03	2.22	17	2.47	2.78
9	2.11	2.32	18	2.50	2.82
10	2.18	2.41	19	2.53	2.85
11	2.23	2.48	20	2.56	2.88

注：*p* 为置信概率。

(3) 肖维纳准则。若 $|x_i - \bar{x}| > a$ ，则 x_i 是坏值，式中 $a = k\hat{\sigma}$ ，*k* 为置信系数，可由表 2-2 查得。该准则最为简单，但不太可靠，置信概率不明确。

表 2-2 肖维纳准则系数

测量次数 <i>n</i>	置信系数 <i>k</i>	测量次数 <i>n</i>	置信系数 <i>k</i>	测量次数 <i>n</i>	置信系数 <i>k</i>
3	1.38	11	2.00	19	2.22
4	1.54	12	2.04	20	2.24
5	1.65	13	2.07	30	2.39
6	1.73	14	2.10	40	2.50
7	1.79	15	2.13	50	2.58
8	1.86	16	2.16	75	2.71
9	1.92	17	2.18	100	2.81
10	1.96	18	2.20	200	3.02

2.4 仪器选择的一般原则

测量误差的大小直接影响测量结果的有效程度，测量误差的产生是多方面的，仪器仪表的因素是其中至关重要的一环，在测量过程中合理选择测量仪器是非常必要的，仪器的选择一般都要遵循一定的原则。

测量时所使用的仪表，在连续刻度仪表的某一量程内，不同示值处的绝对误差一般不相等。仪表等级不同精确度也不同，仪表等级越大，测量的准确度就越低。其中满量程误差是造成测量误差的主要原因。**满量程相对误差**又叫引用相对误差，定义为绝对误差与测量仪器满刻度值的百分比。

2.4.1 仪表量程的合理原则

由于在实际测量时，示值越接近满量程时，示值的相对误差就越小，因此测量准确度就越高；而示值越小即越偏离满量程，示值的相对误差就越大，测量的准确度就越低。

在实际测量过程中选择仪器应当注意，在使用连续正向刻度的一般电压表、电流表时，为了减小测量中的示值误差，应尽可能选择示值接近满刻度值，一般示值不小于满刻度的 $\frac{2}{3}$ 为宜。

2.4.2 仪表等级的合理选择

仪表等级等于仪表满度相对误差的最大值。仪表的等级数越大，满刻度的相对误差就越大，测量准确度就越低。但对于相同量程的仪表，仪表的等级数越小，测量准确度就越高；而对于不同量程、不同等级的仪表，应根据被测量值的大小，兼顾仪表级别和量程上限合理地进行选择。

2.5 误差数据的处理方法

通过实际测量取得数据后，要先对数据进行整理，即计算、分析、整理数据，得出所需要的结果，再进行处理。数据处理方法应建立在误差分析的基础上，以减少对测量最终结果的影响。一般采用有效数字表示法来处理误差数据。

2.5.1 有效数字的概念

所谓**有效数字**，是指在测量数值中，从最左边一位非零数字算起到含有存疑数字为止的各位数字。 n 位有效数字的定义是：一个 n 位有效数字的前 $(n-1)$ 位是准确可靠的，而末尾一位是欠准的估计数。也就是说，由 $(n-1)$ 位准确数和 1 位欠准确数组成 n 位有效数字。一般规定末位欠准数的误差不超过 0.5。例如，一个 3 位有效数 215 的数值应在 214.5~215.5 之间。所以，从有效数字基本可估计出数据的误差。

有效数字的位数与小数点无关，尾数是“0”也要写出。例如，0.068 是两位有效数字；20.5 和 8.40 都是三位有效数字。特别大和特别小的数可用 10 的乘幂来表示，例如 2.040×10^3 和 35.05×10^{-3} 都是四位有效数字。表 2-3 充分说明了有效数字的概念。

表 2-3 有效数字的判断表

数 字	有效数字位数
5.1416	五位有效数字
5.142	四位有效数字
6700	四位有效数字
67×10^2	二位有效数字
0.067	二位有效数字

由此可见，数据最末一位是欠准确的估计值，称为**欠准数字**。决定有效数字位数的标准是误差，在读取数据时，有效数字应与测量误差一致。一般情况下，0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个数字都有可能是有效数字。开头的 0 不是有效数字，因为它们与测量误差或准确度无关。例如，某电压为 15mV，可表示为 0.015V，这里前边的两个 0 都不是有效数字。

2.5.2 有效数字的处理

1. 多余数字的舍入规则

在处理测量结果时，常有一些数字的数位多于所需的有效位而要剔除多余数位的情况。这时，一般都采用四舍五入的方法来删除多余的数位。

目前广泛采用下述舍入规则，当需要保留 n 位有效数字时：

- (1) 若后面的数字小于第 n 位数字单位的一半，则舍去后面的数字。
- (2) 若后面的数字大于第 n 位数字单位的一半，则第 n 位数字加 1。
- (3) 若后面的数字恰好为第 n 位数字单位的一半，当第 n 位为偶数时舍去后面的数字，当第 n 位为奇数时，则第 n 位数字加 1，即把第 n 位数凑成偶数。

以上规则可简单概括为“小于 5 舍，大于 5 入，等于 5 凑偶”。

一般情况下可用简单的四舍五入法。四舍五入法的舍入规则是：所要的 n 位有效数字

之后的数位是多余位。多余位的前面第一个数如果是 4、3、2、1、0，则舍全部多余位；如果是 5、6、7、8、9，则在舍去全部多余位之后，还必须进位，即在有效数的欠准位上加 1。例如，数据 245.43 和 245.56，用四舍五入法取三位有效数字，分别是 245 和 246。

经过四舍五入法之后有效数末尾欠准位会给数据带来误差。在只有一个多余位的情况下，显然欠准位的最大误差是 -0.4 和 $+0.5$ ；对于有两个多余位的情况，也容易知道，欠准位的最大误差是 ± 0.49 ；对于有三个多余位的情况，欠准位的最大误差是 ± 0.499 ，依次类推。

四舍五入是一个非常简明的舍入方法，一般只看数据的最后一位数来决定四舍五入。舍入处理后的近似数，中间的 0 和末尾的 0 都是有效数字，不能随意添加，多写则夸大了测量准确度，少写则夸大了测量误差。对于测量数据的绝对值比较大而有效数字位数又比较少的测量数据，应采用科学计数法，即 $\alpha \times 10^n$ ， α 的位数由有效数字位数决定。

2. 有效数字的运算规则

当需要对 n 个测量数据进行运算时，要考虑有效数字保留多少位的问题，以便不使运算过于麻烦，而又能正确反映测量的精确度。保留的位数原则上取决于各数中精度最低的那一项。

(1) 加法运算

当多个数据相加时，各项有效数字的位数以小数点后位数最少的一项数据为准。

例如：35.1512+15.04，应变换成 35.15+15.04=50.09。

(2) 减法运算

当相减的两数相差很大时，原则同加法运算。

当相减两数很接近时，在运算中应多取一位有效数字。

例如： $\sqrt{265} \approx 16.28$ 。

对于 $y = \frac{1}{x_1 - x_2}$ ， $x_1 = 2.383$ ， $x_2 = 2.3825$ ，则

若 x_1 、 x_2 保留五位有效数字，则 $y = \frac{1}{2.3830 - 2.3825} = 2000$ ；

若 x_1 、 x_2 保留四位有效数字，则 $y = \frac{1}{2.383 - 2.382} = 1000$ ；

若 x_1 、 x_2 保留三位有效数字，则 $y = \frac{1}{2.38 - 2.38} = \infty$ 。

(3) 乘、除法运算

以有效数字位数最少的数为准，其余参与运算的数字及结果中的有效数字位数与之相等。例如：

$$\frac{120 \times 0.25}{51.2} \approx \frac{120 \times 0.25}{51} \approx 0.588$$

为了保证必要的精度，最终结果也可以比有效数字位数最少者多取一位有效数字。

(4) 乘方、开方运算

运算结果比原数多保留一位有效数字。

例如：

$$\begin{aligned}(27.8)^2 &\approx 772.8 & (115)^2 &\approx 1.322 \times 10^4 \\ \sqrt{9.4} &\approx 3.07 & \sqrt{265} &\approx 16.28\end{aligned}$$

2.6 小 结

本章主要讲述了测量误差的术语、测量误差的表示方法及计算、测量仪器的选择原则和误差数据的处理等内容。

通过对本章的学习，要求掌握测量误差的概念；能计算各种测量误差；掌握有效值的概念，会在实际计算中应用；掌握仪器选择的原则，会正确选择各种测量仪器。

2.7 思考题

1. 什么是绝对误差和相对误差，它们的区别是什么？
2. 简述系统误差、随机误差和粗大误差的概念。
3. 测量误差有哪些表示方法？
4. 标称值为 $1.2\text{K}\Omega$ ，误差为 $\pm 5\%$ 的电阻，其实际值范围是多少？
5. 检定一只 2.5 级量程 100V 的电压表，在 50V 刻度上标准电压表读数为 48V。问在这一点上，电压表是否合格？
6. 有两个放大器，其电压增益分别为：

$$K_1 = (35 \pm 0.2) \text{ dB}$$

$$K_2 = (50 \pm 0.2) \text{ dB}$$

试求这两个放大器的放大倍数、相对误差和绝对误差。

7. 按照舍入规则对下列数据进行处理，使其各保留 3 位有效数字：86.3724、8.9145、3.1750、0.003125、59.450。
8. 按照有效数字运算法则，计算下列结果：
 - (1) 1.0713×3.2
 - (2) 1.0713×3.20
 - (3) 40.313×4.52
 - (4) 51.4×3.7

(5) 56.09 ± 3.2

(6) $70.4 - 0.453$

9. 用两种不同的方法测电阻，若测量中均无系统误差，则所得的阻值为：

第一种方法：（测 8 次）

100.36、100.41、100.28、100.30、100.32、100.31、100.37、100.29

第二种方法：（测 6 次）

100.33、100.35、100.29、100.31、100.30、100.28

若分别用以上两组数据的平均值作为电阻的两个估计值，问哪个估计值更可靠？

第 3 章 电子测量常用信号发生器

3.1 概 述

信号发生器又称信号源，是电子测量系统不可缺少的重要设备。它的功能是产生测量系统所需的不同频率、不同幅度的各种波形信号。这些信号主要用来测试、校准和维修设备。信号发生器可以产生方波、三角波、锯齿波、正弦波和正负脉冲信号等。

在电子测量过程中，测量元件参数值、放大系数、频率特性等都要借助某种电信号的激励才能测量，另外电子设备的研制与生产也离不开信号发生器。可以说，几乎对所有电参量的测量都需要用到信号源。它是电子测量时使用最广泛的仪器之一。

信号发生器有 3 方面的用途：

- (1) 作为电子设备的激励信号。
- (2) 作为信号仿真，模拟电子设备所需的与实际环境特性相同的信号，来测试设备的性能。
- (3) 作为标准信号源对一般信号源进行校对或对比。

信号发生器按其用途通常可以分为通用信号发生器和专用信号发生器两大类。通用信号发生器按输出信号的波形主要分为：正弦信号发生器、函数信号发生器和脉冲信号发生器；专用信号发生器仅用于有特殊要求的信号仿真和测量，基本上不能做其他用途。

3.2 正弦信号发生器

3.2.1 正弦信号发生器的分类和基本组成

正弦信号发生器在电子测量中具有特殊的作用和意义。信号中最常用的是正弦波信号，首先正弦波波形不会受到线性系统的影响。也就是说，正弦波信号作为线性系统的输入，经过线性系统运行之后，其输出仍为同频正弦波，不会产生畸变。即线性系统内部所用的电压和电流也都是同频的正弦信号，仅仅是幅值和相位会有所差别。总之，其波形不受线性系统的影响。

正弦信号发生器按产生信号的频带分类，通常分为如下 6 类：

- (1) 超低频信号发生器。频率为 $0.0001\text{Hz} \sim 1000\text{Hz}$ 。
- (2) 低频信号发生器。频率为 $1\text{kHz} \sim 1\text{MHz}$ ，其中用得最多的是音频信号发生器，频率范围为 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 。
- (3) 视频信号发生器。频率为 $20\text{kHz} \sim 10\text{MHz}$ 。
- (4) 高频信号发生器。频率为 $100\text{kHz} \sim 30\text{MHz}$ ，大致相当于长、中、短波段的范围。
- (5) 甚高频信号发生器。频率为 $30\text{MHz} \sim 300\text{MHz}$ ，相当于米波段。
- (6) 超高频信号发生器。频率为 300MHz 以上，又称为微波信号发生器。

正弦信号发生器的组成相似，一般由振荡器、变换器、指示环节部分、电源和输出电路组成，如图 3-1 所示。

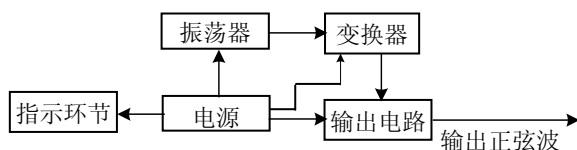


图 3-1 正弦信号发生器的组成框图

3.2.2 低频信号发生器

低频信号发生器在电子测量中具有广泛的应用，主要用来产生频率为 $1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 的低频正弦信号。除了具有电压输出的功能外，有的还有功率输出功能。其主要用途是测试及检修各种电子仪器和家用电器中的低频放大电路，也可用于测量扬声器、滤波器等器件的频率特性，还可用作高频信号发生器的外部调制信号源。低频信号发生器的基本组成框图如图 3-2 所示。

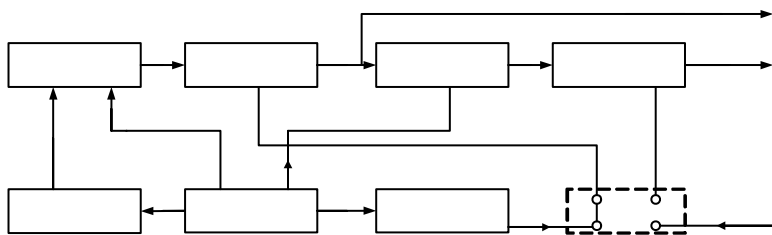


图 3-2 低频信号发生器的组成框图

- (1) 主振器。主振器是低频信号发生器的核心，它通过自激振荡产生低频信号，决定输出信号的频率范围和稳定度。目前，低频信号发生器的主振器一般都采用文氏电桥 RC

振荡器，不使用 LC 振荡电路。RC 电路结构简单，可在宽频率范围内连续调节振荡频率，适合于 1MHz 以下的低频应用。在 RC 振荡器中用 RC 串、并联电路选频。通过改变选频网络的电容器容量来改变频段，调节电位器使同一频段的频率连续变化。这种振荡器产生的正弦波频率调节方便、可调范围较宽、振荡频率稳定、谐波失真小。

(2) 电压放大器。电压放大器把主振荡器产生的低频正弦信号放大，以达到电压输出幅度的要求，并由主振荡器输出调节电位器调节输出电压的大小。主振荡器和电压放大器的原理框图如图 3-3 所示。

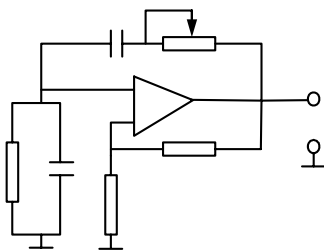


图 3-3 主振荡器和电压放大器原理框图

(3) 输出衰减器。输出衰减器是用于改变信号放大器的输出电压或输出功率，通常进行步进调节，步进调节由电阻分压器实现，如图 3-4 所示。

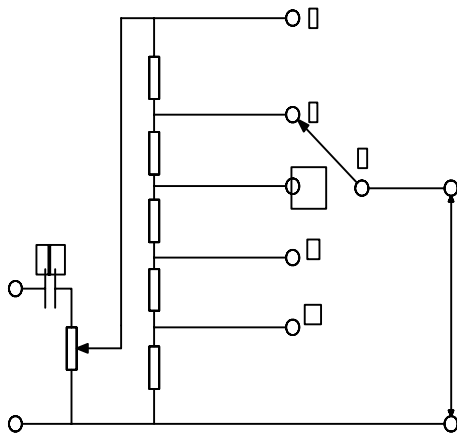


图 3-4 输出衰减器的结构原理图

从图 3-4 可以看出该输出衰减器是由电位器 R_p 取出一部分信号电压加于由 $R_1 \sim R_5$ 组成的步进衰减器，调节电位器在不同位置，或调节波段开关 S 处于不同的挡位，均可使衰减器输出不同的电压。信号发生器对步进衰减量的表示通常有两种：一种是直接用步进衰减

器的输出电压 U_{out} 与输入电压 U_{in} 的比值表示；另一种是将上述的比值取对数再乘以 20，单位是分贝。

(4) 功率放大器。功率放大器的作用是对输出衰减器送来的电压信号进行功率放大，使之达到额定的功率输出，所以它要求工作效率高，谐波失真小。

(5) 阻抗变换器。阻抗变换器用来匹配不同阻抗的负载，以便获得更大的输出功率。

(6) 指示电压表。指示电压表用来显示不同的测量值，可用开关“S”进行转换，当它置于“1”时，电压表指示电压放大器的输出电压幅度；当它置于“2”时，电压表指示功率放大器的输出电压幅度；当它置于“3”时，则对外部信号电压进行测量。

(7) 稳压电源。稳压电源用来为各电路提高合适而且稳定的直流电压，使各电路能正常工作。

低频信号发生器在使用过程中，首先应考虑的是频率范围，其次应考虑的是输出阻抗和输出功率。各种低频信号发生器功率端的输出阻抗不相同，使用时应尽量选择与被测电路的阻抗相等或相近，以获得足够的功率，减小波形失真。使用时还要考虑其他技术指标，如非线性失真等。目前常见的低频信号发生器的型号和性能如表 3-1 所示。

表 3-1 低频信号发生器的型号和性能

型 号	工 作 频 率	输 出 幅 度	输 出 阻 抗	备 注
XD-1、XD-1A、 XD-1B、XD-2 XD-2A、XD-2B	1Hz~1MHz (分为 6 个频段)	输出电压>5V 输出功率>4W 在 100Hz~100kHz 内>5W	50Ω, 75Ω, 150Ω, 600Ω, 5kΩ	非 线 性 失 真：在 200Hz~20kHz 内电 压输出<0.1%，功率输 出<0.5%
XD-7	20Hz~20kHz	输出电压≥5V 输出功率≥5W	8Ω, 600Ω, 5kΩ	非 线 性 失 真：在 20Hz~20kHz 内电压 输出<0.2%，功率输出 ≤1%
XFD6	20Hz~20kHz	输出电压高阻抗 0~20V 600Ω 时 0~1V 输出功率 5W	600Ω, 高阻抗	非 线 性 失 真：在 20Hz~20kHz 内电压 输出<0.2%，功率输出 ≤1%
XFD7	20Hz~20kHz	输出电压为 5V 输出功率为 5W	50Ω, 150Ω, 600Ω, 5kΩ	非线性失真： 功率输出 0.5W 时， 400Hz~5kHz，电压输 出≤1%
XFC-6 型标准 信号发生器	4kHz~300MHz	输出电压为 0.05μV~50mV	75Ω	调幅度 0~80%
XQ-10A	0.001kHz~100kHz	输出电压为 5V 输 出功率为 125mW	200Ω, 600Ω	具有双相(0° 和 90°) 输出，以及方波、脉冲

低频信号发生器在使用前先将外壳接地，以免机壳带电。开机前将输出细调旋钮旋至最小，然后接通电源预热，待信号发生器稳定工作后方可投入使用。

3.2.3 高频信号发生器

高频信号发生器主要用来向各种高频电子设备和电路提供高频信号，或提供标准高频正弦信号，以便测试它们的电气工作性能。它又被称为射频信号源，信号频率大致在 $30\text{kHz}\sim 1\text{GHz}$ 范围，常应用于通信设备的测试。这种信号源一般都具有正弦波的调幅和调频功能，它的原理结构方框图如图 3-5 所示。

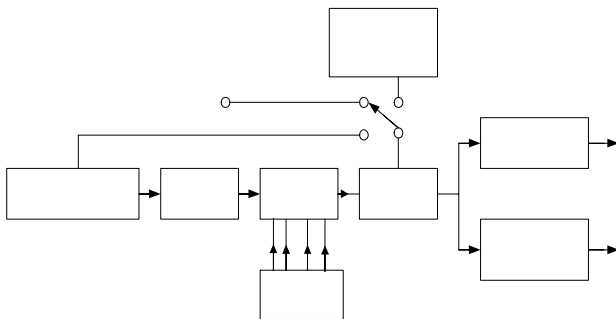


图 3-5 高频信号发生器原理方框图

高频信号发生器主要由振荡器、缓冲级、调制级、输出电路、电压指示电路、内外调制振荡输入电路和电源等组成。

1. 振荡器

振荡器一般都是 LC 振荡器，产生高频振荡信号。该信号经缓冲级缓冲后，被送到调制级调制和放大幅度，调制后的信号再送给输出电路输出，以保证具有一定的输出电平调节范围。使用 LC 振荡器，波段覆盖不宽，所以高频信号发生器都为多波段式。用转动电感线圈的方法更换波段，在同一波段内用改变电容的方法连续调整频率。高频信号发生器的振荡器决定了高频信号发生器的主要工作特性。按产生振荡信号方法的不同，高频信号发生器可分为调谐信号发生器、锁相信号发生器和锁相合成信号发生器 3 大类。

(1) 调谐信号发生器。它的振荡器是调谐振荡器，常用的调谐振荡器就是晶体管 LC 振荡电路。晶体管 LC 振荡电路必须在一定的频率范围内工作，频率稳定度和准确度都不高。为了克服这个缺点，使高频信号发生器有较宽的工作频率范围，以保证高的频率稳定度和准确度，可以在振荡器后加倍频器、分频器、混频器等，这种技术称为直接频率合成技术。该技术的优点是工作可靠，频率转换速度快，但需要大量的混频器、分频器和窄带

外调制输入

可变电阻器 振荡器

缓冲级

振荡器

滤波器等, 这样使得仪器体积大, 价格昂贵。

(2) 锁相信号发生器。它是在高性能的调谐信号发生器中增加频率计数器, 在锁相式频率合成中, 利用锁相环把压控振荡器的输出频率锁定在基准频率上。锁相环是指相位比较器 (PD)、环路滤波器 (LPF) 和压控振荡器 (VCO) 组成的闭环环路。其原理框图如图 3-6 所示。

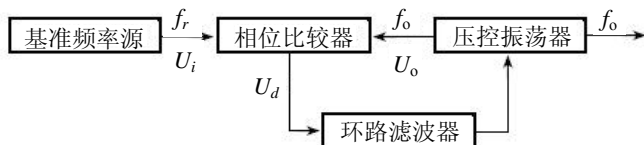


图 3-6 锁相环原理框图

相位比较器用来比较两个输入信号的相位, 其输出电压与两信号相位差的比例叫“误差电压”; 压控振荡器的振荡频率可用电压控制, 一般都利用变容二极管 (变容管) 作为回路电容。这样, 改变变容二极管的反向偏压, 其电容将改变, 从而使振荡频率随反向偏压而变化, 故名“压控”振荡器; 环路滤波器实际上是一个低通滤波器, 用来滤掉相位比较器输出的高频成分和噪声, 以达到稳定环路工作和改善环路性能的目的。几乎所有合成器的基本单元电路都是锁相环。在最简单的锁相环中, 压控振荡器的输出频率 (或经分频后输出) f_o 在鉴相器与基准频率 f_r 相比较, 若存在频差 $\Delta f = f_o - f_r$, 那么, 两信号间也必存在相位差 ϕ , 且随时间而变化。相位比较器将这个相位差的变化输出, 即输出相应的误差电压, 后者通过环路滤波器滤波并放大, 反馈到压控振荡器 (VCO), 整其输出频率向 f_o 靠拢以消除相差, 称为“频率牵引”现象, 直至 $f_o = f_r$; 环路进入“锁定”状态, 此时 f_o 与 f_r 之间只存在一个稳定相差, 而不存在频差。因为只有两频率相等的正弦波之间才能有稳定的相差, 否则相差是随时间变化的函数。环路从失锁状态进入锁定状态的上述过程, 称为锁相环的捕捉过程。

(3) 锁相合成信号发生器。锁相合成法是利用锁相环的特性, 把压控振荡器 (VCO) (或经分频器) 的输出频率稳定在基准频率上。这样, 也就是把压控振荡器 (VCO) 的输出频率稳定度提高到与基准频率同一量级, 这就是锁相合成法的基本原理。锁相合成法克服了直接合成法的许多缺点, 特别是易于集成化 (体积小、功耗小、价廉、适合于大规模生产), 具有极宽的频率范围和十分良好的寄生信号抑制特性, 因而输出频谱纯度很高, 而且输出频率易用微机控制, 故锁相技术在频率合成技术中获得广泛应用。

2. 调制级

调制级用于放大振荡信号, 并起缓冲作用, 以减小调制级对振荡器的影响。

载频的调幅通常在末级或末前级进行，能减少由于放大器的非线性所产生的高次谐波输出。通常仪器内部设有 400Hz 和 1kHz 的内调谐振荡器，但也可由外部提供 20kHz 以下的正弦信号作为外调制信号。在调频（FM）工作时，调制信号控制振荡回路电抗元件的参数，使回路谐振频率的变化与调制电压成比例；在调幅（AM）工作时，调制电压控制高频波的振幅值，使振幅值与调制电压成比例。

3. 输出级

一般情况下，高频信号输出级具有分挡（步进）式、连续微调式和电缆分压式衰减器，使输出信号的大小可以随意地调节。输出级还必须有限阻转换器，使输出阻抗与负载匹配。

3.3 函数信号发生器

函数信号发生器是一种多波信号源，可以输出方波、三角波、正弦波、锯齿波、上升或下降斜坡波、指数或对数波等。如果把函数信号发生器引入微机，那么可以产生的波形种类更多。由于其输出信号波形是数学函数曲线，均可用数学函数来描述，故被称为函数信号发生器。目前函数信号发生器输出信号重复频率范围是 $1\mu\text{Hz}\sim 50\text{MHz}$ 。一般地，除了用于实验室作为信号源使用之外，还可以用来测试各种电路的瞬时特性、数字电路的逻辑功能、模拟转换器、压控振荡器以及锁相环的性能。另外，它还广泛应用于科学技术其他非电专业的众多领域。

3.3.1 函数发生器的分类

函数发生器产生三角波的方案很多，如施密特电路式、恒流源控制式、线性积分电路和运算放大器构成式等，它们的基本思想都是利用电容的充放电来获得线性斜升及线性斜降的电压。

1. 施密特电路式

该方法是先由外触发或内触发产生脉冲，施密特触发电路产生方波，经过积分产生三角波或锯齿波，调节积分时间常数 RC ，再经过非线性变换产生其他波形。如图 3-7 为施密特电路式三角波发生器原理框图。

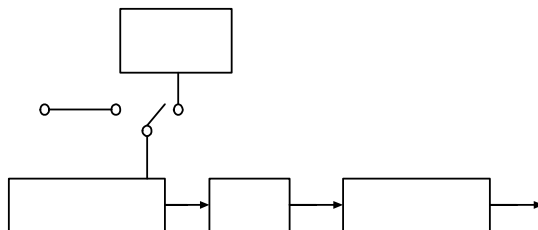


图 3-7 施密特电路式三角波形成电路原理框图

内触发脉冲
发生器

外触发脉冲输入

2. 恒流源控制式

该方法由恒流源控制电路、恒流源、积分器（包括积分电容 C 和运算放大器 A ）和幅度控制电路构成。图 3-8 是恒流源控制式三角波形成电路原理框图。

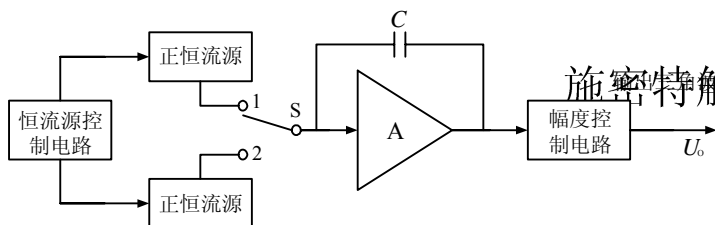


图 3-8 恒流源控制式三角波形成电路原理框图

施密特触发器

积分器

该电路当开关 S 拨向“1”时，正恒流源向积分电容充电，形成三角波的斜升过程，积分器输出电压为：

$$u_{01} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

上式中， u_{01} ——斜升输出电压的瞬时值；

i ——积分电容支路的电流瞬时值；

t ——电容充放电时间。

因为充电电流是恒流源，故上式可表示为

$$u_{01} = \frac{I_1}{C} t$$

上式中， u_{01} ——斜升输出电压的瞬时值；

I_1 ——正电流源的电流值；

t ——电容充放电时间；

C ——积分电容的电容量。

通过上式可以看出，改变恒流源的电流 I_1 或积分电容值 C 可以改变输出电压 u_{01} 的变化

斜率，也就是通过改变 C 和 I_1 的值，来改变三角波的频率。

3.3.2 其他类型的函数发生器

1. 产生调制信号的函数发生器

函数发生器还可以产生调制信号。调制信号是通信设备和在信道测试中普遍应用的信号。产生调频信号比较方便，很多带调制功能的函数发生器都备有一个输入端，需要时可以将调制电压加到这个输入端上，而仪器将该电压叠加在内部的频率控制电压上，从而改变输出频率，有的函数发生器内部备有调制信号发生器，需要时通过开关转换，很方便地加上调制电压，得到调频波。

2. 具有扫频能力的函数发生器

函数发生器还具有扫频能力。利用一般的信号测量系统的频率特性时，是将输出依次设置在所需范围内若干个频率点上，分别测出各点的响应之后，再把它们连成曲线，如果系统频带很宽，要取的点很多，测量将很费时。如果信号发生器的输出频率能够在测量范围内连续扫描，则可连续地测出各点频率上的结果，立即显示出频率特性曲线，不但费时少，而且准确度高，不会丢失某些细节。同时具有合成信号源和扫频特性的信号源，也称为合成扫频信号源。图 3-9 是一个具有扫频功能的函数发生器原理方框图。

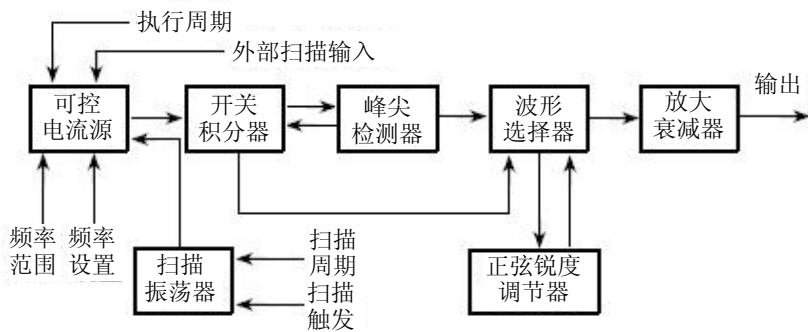


图 3-9 具有扫频功能的函数发生器原理方框图

3.3.3 函数发生器的性能和应用

1. 函数信号发生器的性能指标

(1) 输出波形。输出波形有正弦波、方波、脉冲和三角波等波形，具有单位脉冲输出及 TTL（三极管—三极管逻辑电路）信号同步输出即将方波经三极管电路转成 0V、5V 的

信号。

(2) 频率范围。频率范围一般分为若干频段,如:1Hz~10Hz、10Hz~100Hz、100Hz~1kHz、1kHz~10kHz、10kHz~100kHz、100kHz~1MHz 等 6 个波段。

(3) 输出电压。一般指输出电压的峰—峰值。

(4) 波形特性。不同波形有不同的表示法。正弦波的特性一般用非线性失真系数来表示,一般要求该系数小于等于 3%;三角波的特性用非线性系数表示,一般要求该系数小于等于 2%;方波的特性用上升时间来表示,一般要求该系数小于等于 100ns。

(5) 输出阻抗。函数输出 50Ω; TTL 同步输出 600Ω。

2. 函数信号发生器的应用

函数信号发生器可用于对音频放大器、滤波器及自动测试系统的测试,如图 3-10 所示的连线图用于测量低频放大器的幅频特性。

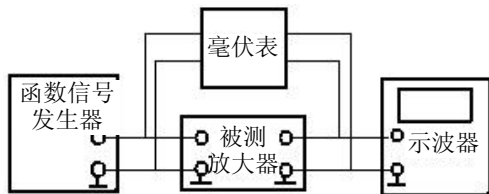


图 3-10 放大器幅频特性测试连线图

调节函数信号发生器,使其输出频率为 1kHz、幅度为 10mV 的正弦信号,并将其送到被测放大器的输入端。在被测放大器输出端接上负载电阻 R_L 后,再将输出接到毫伏表或示波器的Y输入端,测出放大器在 1kHz 时的输出电压值。按被测电路的技术指标,在保持函数发生器输出幅度不变的情况下,逐点改变信号发生器的频率,逐点记录被测放大器的输出电压值。然后,根据记录数据画出被测放大器的频率特性曲线。

3.4 脉冲信号发生器

3.4.1 脉冲信号发生器的特点和分类

脉冲信号发生器即产生脉冲的信号源。脉冲信号源是脉冲数字电路、数字集成电路等测试用的主要信号源,还具有测试宽带放大器的暂态响应特性和逻辑元件的开关速度等用途,也应用于电视、雷达、自动控制和多路通信等领域。

脉冲信号发生器有射频脉冲信号发生器和视频脉冲信号发生器两种。前者一般由高频

或超高频信号发生器处于通断脉冲调制状态而获得。而通用脉冲信号发生器都是以产生矩形脉冲为主的视频脉冲信号发生器。

3.4.2 脉冲信号发生器的工作原理

通用脉冲信号发生器主要输出矩形脉冲。矩形脉冲的主要参数是脉冲重复频率、脉冲幅度、脉冲宽度、上升和下降时间等。脉冲信号源应当在较宽的范围内能够对这些参数进行独立调节。如图 3-11 是脉冲信号发生器的原理框图。

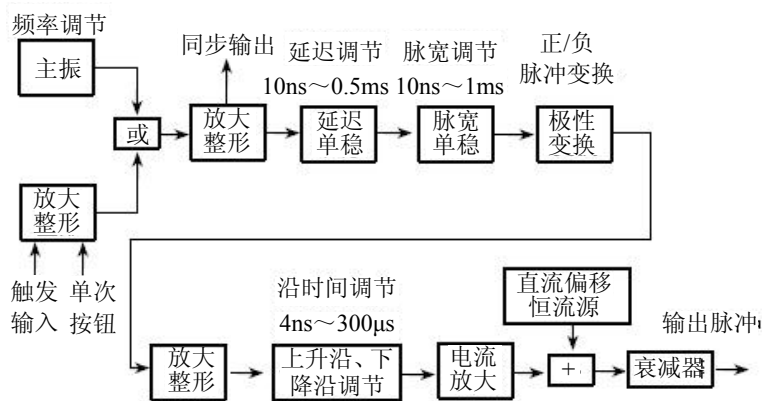


图 3-11 脉冲信号发生器的原理框图

主振是一个电流开关型射极 RC 定时自激多谐振荡器。实际上，整个信号发生器基本都采用电流开关型、射极耦合、电压嵌位等高速脉冲电路。主振输出方波，方波经放大整形输出所需测试脉冲；故其重复频率等于主振频率。产生脉冲的触发方式除用主振—触发外，还可用外输入信号触发，或用按钮单次触发。

主振器一般采用多谐振荡器或间歇振荡器，其振荡频率一般可以通过改变定时电容进行分挡粗调，用充放电电阻 R 进行细调。外触发输入可以代替主振，这时仪器输出脉冲的重复频率与外触发脉冲同相。经过或门后输出同步脉冲，用于保证测试时系统的同步。

在很多测量情况下常要求脉冲信号源有同步脉冲输出，同步脉冲必须超前测试脉冲一段时间。例如，用示波器观测电路对脉冲的响应，同步脉冲可使示波器提前扫描；测试数字脉冲电路时，同步脉冲可做复位脉冲之用。图 3-11 中的延迟单稳就是让主脉冲滞后同步脉冲一段时间。脉宽单稳控制主脉冲的宽度。极性变换可使输出主脉冲的正向脉冲变成负向脉冲或相反变换。上升沿、下降沿调节可以确定主脉冲前后沿的升降时间（或斜率），以满足测量要求。

脉冲输出级包含电流放大、直流偏移、衰减器等单元电路。来到输出级的主脉冲电压

经电流放大器变成相对大的电流（恒流源），流过负载电阻，形成脉冲电压输出。如果外负载本身是低阻抗，则这个终接电阻应当断开。直流偏移的恒流源提供可变的正/负直流恒流值，与脉冲电流相加，可调节输出脉冲的直流电平。

3.5 频率合成信号发生器

随着现代电子技术的发展，对信号源的稳定性和准确度提出了越来越高的要求。一个信号发生器输出信号频率的准确度和稳定性在很大程度上是由主振器的输出频率稳定度所决定的。例如在无限电通信系统中，蜂窝通信频段一般为 912MHz，并以 30kHz 步进。为此，信号频率的稳定度的要求必须优于 10^{-2} 。同样，在电子测量技术中，要对电子设备进行准确的频率测量，信号源频率的稳定度和准确度必须足够高。在以 RC、LC 网络为主振级的信号源中，频率准确度仅为 10^{-2} 量级，频率稳定度仅达 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级，远远不能满足通信和电子测量的要求。而石英晶体振荡器的频率稳定度优于 10^{-8} 量级，但是它只能产生某些特定的频率。

频率合成信号发生器也称为频率综合器，它是将一个（或几个）基准频率，利用电子技术综合产生一系列的信号源。其中基准频率一般都由石英晶体振荡器产生，基准频率的精度很高。该信号源具有良好的输出特性和调制特性，同时还具有高稳定度、高分辨力等优点，而且输出信号的频率及电平调制深度均可程控，是一种性能优越的信号发生器。

频率合成是对一个或多个基准频率进行频率的加减（混频）、乘（倍频）、除（分频）运算，从而得到所需的频率。这一系列频率的准确度和稳定性取决于基准频率。

3.5.1 频率合成信号发生器的组成

频率合成信号发生器除了频率合成器以外，还应包括输出控制、显示和电源等部分，如图 3-12 所示。频率合成信号发生器实际上是频率合成器产生的信号输出到输出部分，通过放大、滤波稳幅及必要的调制，最后产生所需的信号。控制部分则控制整个仪器的工作，如接受键盘命令、设置频率值及控制显示等。

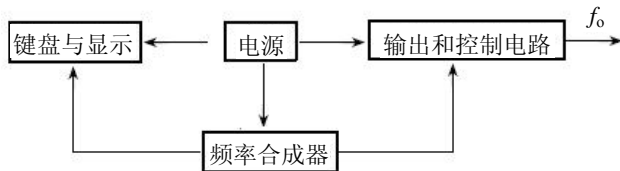


图 3-12 频率合成信号发生器原理框图

1. 频率合成器

频率合成器是频率合成信号发生器的核心，它的性能直接影响频率合成信号发生器的性能。例如，在以锁相环合成的电路中，合成信号发生器的频率范围取决于 VCO 和分频器的性能，频率稳定性取决于所用晶振的性能指标。频谱纯度指标几乎与锁相环路中的所有部分有关。

2. 输出电路

输出电路主要负责将频率合成器输出的信号进行放大、滤波、稳幅、调幅、脉调和衰减等。输出部分的另一任务是对频率合成器的谐波和内部产生的杂散频率进行滤波，通常用可编程的滤波器。

3. 控制电路

控制部分电路主要完成以下任务：

- (1) 利用软件及相关电路控制面板输入及显示。
- (2) 自检、自诊断功能。
- (3) 自校、自修正功能。
- (4) 接受远地程控的能力。

控制电路的 CPU 已从 8 位向 16 位甚至 32 位机发展，软件在仪器中的地位越来越重要。

4. 显示与电源电路

现代频率合成信号发生器中，人机接口愈来愈方便和友好。而显示趋向大屏幕液晶菜单显示，并采用虚拟仪器面板。使用者可以通过鼠标在虚拟面板上控制模块的工作，并且显示更直观，更方便。

电源除要求足够的功率外，还要求小的纹波电压，这样可减小输出频率的相位噪声。有些合成信号发生器采用开关电源，从而把低频纹波转换到高频率上，有利于对低频纹波的消除。

3.5.2 频率合成器的原理

频率合成信号发生器的核心是频率合成器。频率合成器的主振器采用了石英晶体振荡器，频率合成器实现频率合成的方法可分为直接合成法和间接合成法两种。直接合成法又可分成模拟和数字式合成法，实际上，一个合成信号发生器可能采用多种合成法；间接合成法是基于锁相环原理实现的。

1. 模拟直接合成法

模拟直接合成法是将基准晶体振荡器产生的标准频率信号，利用倍频器、分频器、混频器及滤波器等进行一系列四则运算，以获得需要的频率输出。在这种合成法中，又可分为相干式直接合成法和非相干式直接合成法。如果用多个石英晶体产生基准频率，产生混频的两个基准频率之间是相互独立的，就叫做非相干直接合成器；如果只用一个石英晶体产生基准频率，然后通过分频、倍频等，使加入混频器的频率之间是相关的，就称为相干式频率合成器。图 3-13 为相干式直接频率合成器原理框图。

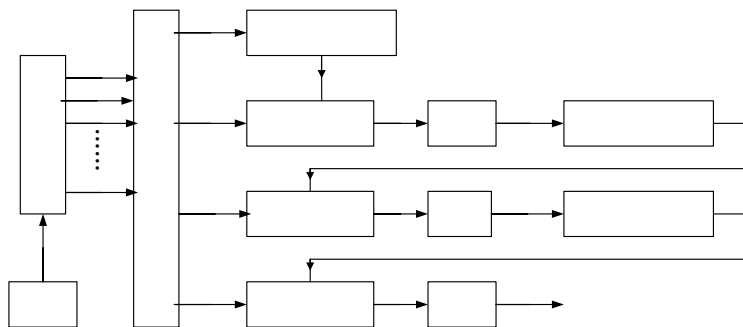


图 3-13 相干式直接频率合成器原理方框图

若要从 1MHz 信号的晶体振荡器中获得 4.628MHz 的信号，可以先将 1MHz 信号输入谐波发生器中产生各次谐波。从谐波发生器中选出 8MHz 信号，经分频器除以 10 变成 0.8MHz 信号。将其与从谐波发生器选出的 2MHz 信号进入混频器混频，经滤波器选出 2.8MHz 信号，并除以 10 后得 0.28MHz 信号。再从谐波发生器取出 6MHz 信号与 0.28MHz 信号混频，得到 6.28MHz 信号，经滤波之后再经分频器除以 10 得 0.628MHz 信号。再将它与从谐波发生器选出的 4MHz 信号进行混频，经滤波后输出 4.628MHz 信号。从图 3-13 可以看出，要得到 4.628 MHz 信号，只要把频率合成器的开关放在 8 MHz、2MHz、6MHz、4MHz、2MHz 的位置上即可。

从图 3-13 还可以看出，增加一级基本运算单元，就可以使频率分辨率提高一个量级。这种直接式频率合成器的优点是频率转换时间短，并能产生任意小的频率增量。它的缺点是频率范围受到限制（指上限），因为分频器的输入频率不能太高。另外，这种合成器采用大量的倍频、混频、滤波等部件。不仅成本高、体积大，而且输出谐波、噪声调制都难以抑制，从而影响频率的稳定度。现在，商品化频率合成器中已很少使用这种合成器。

2. 数字直接合成法

直接数字频率合成是一种新型的合成方法，与直接频率合成和锁相式频率合成在原理

晶振
1MHz

混频 (+)

频率选择开关

混频 (+)

频率选择开关

混频 (+)

频率选择开关

混频 (+)

频率选择开关

混频 (+)

频率选择开关

混频 (+)

频率选择开关

混频 (+)

频率选择开关

混频 (+)

上完全不同。它突破了前两种频率合成法的原理，从“相位”的概念出发进行频率合成。它的基本原理是不同的相位给出不同的电压幅值，即对应输出信号的一个周期（相应的相位为 2π ），给出按一定电压幅度变化规律组成的输出波形。由于它不但给出了不同频率和不同相位，而且可以给出不同的波形，因此，这种方法又被称为波形合成法。图 3-14 为直接数字频率合成器的结构框图。

由该图可见，要合成任意波形，首先要找出波形的幅度和相位的关系，然后用一个相码/幅码转换器将相码转换成相应的合成波形的幅码，经过编码按一定地址存入数据存储器 ROM 中。当形成波形时，在标准时钟 CLK 的作用下，通过控制电路按照一定地址关系从 ROM 中读出数据。然后用数/模转换器变换成阶梯波形，通过平滑滤波器滤除谐波，得到需要的合成波形。

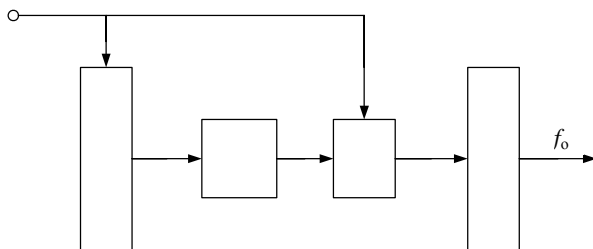


图 3-14 直接数字频率合成器的原理方框图

现以正弦波为例，说明直接数字频率合成的过程，在正弦波一个周期（ 360° ）内，按相位划分为 60 等份。因为正弦波对 180° 为奇对称，对 90° 和 270° 为偶对称，因此，只需要在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内，求出与之对应的幅度值就足够了。编码存入 ROM 中。合成波形时，在标准时钟的作用下，控制电路按照一定的地址关系从数据存储器 ROM 单元中读出数据，再进行数模转换，就可得一定频率的输出波形。

3. 间接合成法

目前，频率合成器都采用锁相环路，尤其是采用了数字分频器的数字环路之后，使它在技术上产生了一个飞跃。采用这种方案的频率合成器常被称为间接合成方式。图 3-6 是锁相环原理框图。压控振荡器的输出频率 f 反馈至鉴相器，与基准频率 f_0 进行同频率的相位比较，鉴相器输出的直流电压与两信号的相位差成正比，图中压控振荡器（VCO）产生的频率经过分频后被送到鉴相器中与参考频率鉴相，鉴相后的误差电压经低通滤波器滤除高频分量，这个电压再去控制压控振荡器，其结果是使 VCO 的频率锁定到参考频率上。锁定时，参考频率与经 $1/N$ 分频后的 VCO 输出频率的频差为零，而相位差保持一个常量。输入参考频率与输出频率具有如下关系：

CLK

控制
电路

ROM

$$f_o = Nf_r$$

式中, f_o ——VCO 的输出频率;

N ——可变分频器的分频比;

f_r ——输入参考频率。

由上式可见, 改变分频器的分频比时, f_o 会随之发生变化。而环路的最小频率增量等于 f_r 。

锁相环路的优点如下:

(1) 输出频率的长期稳定度提高到参考振荡器相同的水平, 而参考振荡器一般用长期稳定性指标很好的晶体振荡器, 甚至采用更高的频率标准。

(2) 频率的改变由可变 $1/N$ 分频器完成, 易于实现程控。

(3) 只需要很少的滤波器, 易于集成。

实际应用中, 采用一个锁相环路的频率合成方式称作单环方案。在单环方案中, 由于只使用了一个锁相环, 所以它的结构简单, 在很多经济型或性价比较高的合成器中采用。它的缺点是不能兼顾频率分辨率、频率转换时间和频谱纯度三者间的矛盾。当需要输出频率分辨率高, 频率转换时间快, 又要求频谱纯度高时, 通常采用多环的方案。

但是, 单环方案的缺点正随着电子技术的发展而得到很好的改善, 如小数分频的方法就是一个行之有效的方法。目前采用单环方案的如马可尼 2030/40 或 HP8647/48 等合成信号发生器就已经达到了多环方案的性能。

3.5.3 频率合成信号发生器的主要技术指标

频率合成信号发生器的技术指标主要有频率、频谱纯度、输出范围和调制特性等。

1. 频率

(1) 频率范围。频率范围决定合成信号发生器的使用范围, 在通信测试时, 往往希望信号发生器频率能覆盖从基带到接收机本振中频很宽的频率范围。

(2) 频率分辨率。频率分辨率的大小可以确定信号发生器最小的频率可改变量。分辨率越高, 频率细调越方便, 应用范围越广。在窄带滤波器中, 晶体滤波器或晶体管性能测试时, 通常要求频率分辨率为 10kHz 到 0.1MHz。

(3) 频率准确度。频率准确度决定信号源频率重复性的好坏。合成信号源频率准确度取决于基准振荡器的准确度和老化率, 常用百分数来表征。

(4) 频率长期稳定度。通常把大于或等于 1s 的频率漂移或频率的不稳定度称为频率的长期稳定度, 其指标也用每小时或每日来衡量。

2. 频谱纯度

- (1) 相位噪声。相位噪声表示在 1Hz 带宽内对噪声的积分值与载波功率之比的对数值。
- (2) 剩余调频。剩余调频是指在载波的情况下不需要的调频，用有效值表示。
- (3) 剩余调幅。剩余调幅是噪声调制载波引起信号幅度的波动，通常用 dbc 表示。
- (4) 谐波。谐波指基波整数倍的频率分量。
- (5) 杂波。杂波是指谐波以外的离散频谱。

3. 输出范围

输出范围是信号发生器的又一个重要指标。为了便于使用，信号发生器的输出电平必须在特定的范围内，按照特性阻抗校准，一般采用 50Ω 负载的接收机测量的电平大小即是该信号发生器的泄漏（或称辐射）。泄漏指标在测量呼叫电台的灵敏度等低电平应用中至关重要。

4. 调制特性

调制特性包括调幅特性和调频特性。

(1) 调幅

调幅的指标包括调幅深度、调幅精度、调幅失真、调制频率等。

① **调幅深度**是指载波幅度随调制信号变化的程度，也称调幅度，用百分比表示。在标准接收机测试 30% 的调幅度已足够。

② **调幅精度**是指调幅深度的标称值与实际值之间的误差。

③ **调幅失真**的大小取决于自动电平控制环路跟踪调幅包络线的能力。通常调幅深度越大，调制频率越高，失真越大。

(2) 调频

调频与调幅指标对应的有关频偏、频偏精度、调频失真、调频 3dB 带宽及调频时的寄生调幅等。频偏是调频时，瞬时频率偏离中心频率的程度，调频失真主要取决于调制频率和频偏的大小。

3.6 小 结

本章主要介绍了正弦信号发生器、函数信号发生器、脉冲信号发生器、频率合成信号发生器的组成和工作原理。介绍了正弦信号发生器和函数信号发生器的分类以及它们的应用。

要求大家通过本章的学习掌握正弦信号发生器、函数信号发生器、脉冲信号发生器、频率合成信号发生器的工作原理以及在测量中的应用。

3.7 思考题

1. 简述信号发生器的分类和作用。
2. 简述低频信号发生器和高频信号发生器的区别。
3. 函数信号发生器通常是先产生三角波，然后用三角波形成矩形波和正弦波。试设计先产生正弦波和先产生矩形波的函数发生器的原理框图方案。
4. 简述脉冲发生器的工作原理。
5. 什么是频率合成器？试说明频率合成器的各种方法及其优缺点。

第 4 章 常用元器件的测量与仪器

4.1 概 述

电路元件，如电阻器、电容器、电感器、晶体二极管及晶体三极管等是组成电子电路的最基本元件。它们的质量和性能的好坏直接影响电路的性能。因此，无论是在设计、生产、使用、调试，还是维护工作中，都必须掌握这些元件的测量方法。

电路元件按其在电路中的作用和使用条件不同，应采用不同的测量方法和测量仪器。但不管测试方法和手段如何变化，电路元件的测量必须保证测试条件与规定的标准工作条件相符合，即测量时所加电压、电流、频率及环境条件等必须符合测量要求。否则，测量结果不能代表实际的参数。

4.2 电阻的测量

在电子电路中，为了控制电压和电流，需要用到电阻器。电阻器通常也叫做电阻。

电阻器常用 R 表示，基本单位为欧姆 (Ω)，常用单位有欧 (Ω)、千欧 ($k\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$)。

电阻器的种类很多，常见的有固定电阻器、可变电阻器（电位器）等。用万用表测试电阻器，是安装与维修工作中十分重要的一环，正确的测试方法是保证测试值准确的关键。

4.2.1 电阻的参数

电阻的参数包括标称阻值、额定功率、精度、最高工作温度、最高工作电压、噪声系数及高频特性等，主要参数为标称阻值和额定功率。其中，**标称阻值**是指电阻上标注的电阻值；**额定功率**是指电阻在一定条件下连续工作所允许承受的最大功率。

1. 电阻规格的直标法

直标法是直接将电阻的类别和主要技术的数值标注在电阻的表面上，如图 4-1 (a) 所示为碳膜电阻，阻值为 $10k\Omega$ ，精度为 1%。图 4-1 (b) 所示为电阻额定功率的直接标识方法。

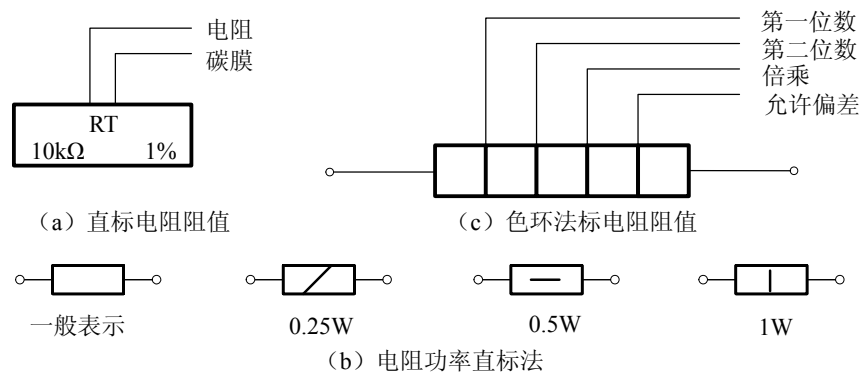


图 4-1 电阻规格标注方法

2. 电阻规格的色环法

色环法是将电阻的类别和主要技术参数的数值用颜色（色环）标注在电阻的表面上，如图 4-1（c）所示。其中，第一、第二色环表示电阻被乘的数值；第三环为倍乘的量值。将第一、第二、第三环分别用 X 、 Y 、 Z 表示，则电阻阻值为：

$$R = (10 \times X + Y) \times 10^Z \Omega$$

第四环表示电阻的误差，各种颜色表示的数值如表 4-1 所示。如四环颜色分别为红、紫、红、金，前三环代表的数字分别为 2、7、2，则电阻值为：

$$R = (10 \times 2 + 7) \times 10^2 = 2700 \Omega = 2.7 \text{ k}\Omega$$

第四环表示该电阻的误差为 $\pm 5\%$ 。

表 4-1 各种颜色表示的数值

颜 色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银	无色
表示数值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10^{-1}	10^{-2}	
表示误差 (%)	± 1	± 2	± 3	± 4							± 5	± 10	± 20

4.2.2 电阻的测量

1. 固定电阻的测量

阻值不变的电阻器，称为固定电阻器，固定电阻器简称电阻。其种类有普通型（线绕、碳膜、金属膜、金属氧化膜、玻璃釉膜、有机实芯、无机实芯等）、精密型（线绕、有机实芯、无机实芯等）、功率型、高压型、高阻型和高频型等 6 类。

测量固定电阻的方法有开路测量和在路测量两种。

(1) 开路测量

用万用表测试固定电阻器，即对独立的电阻元件进行测试。

这种测试方法又叫开路测试法。测试前应先将万用表调零，即把万用表的红表笔与黑表笔相碰，调整调零旋钮，使万用表指针准确地指“0”。

万用表的电阻量程分为几挡，其指针所指数值与量程数相乘即为被测电阻器的实测阻值。例如，把万用表的量程开关拨至 $R \times 1k\Omega$ 挡（也可记作 $\times 1k$ 挡）时，把红、黑表笔进行短接，调整调零旋钮指针至“0”，然后将表笔并联在被测电阻器的两个引脚上，此时若万用表指针指示在“7”上，则该电阻器的阻值为 $7 \times 1k\Omega = 7k\Omega$ 。

在测试中，如果万用表指针停在无穷大处静止不动，则有可能是所选量程太小，此时应把万用表的量程开关拨到更大的量程上，并重新调零后再进行测试。

如果测试时万用表指针的摆动幅度太小，则可继续加大量程，直到指针指示在表盘刻度中间位置，即在全刻度起始的 20%~80% 弧度范围内时测试结果较为准确，此时读出阻值，测试即告结束。

如果在测试过程中发现在最高量程时万用表指针仍停留在无穷大处不摆动，这就表明被测电阻器内部开路，不可再用；反之，在万用表的最低量程时，指针指在“0”处，则说明被测电阻器内部短路，也是不能使用的。

在测试时还需留意拿表笔的双手，手指切不可同时碰触被测电阻器的两个引脚，否则会影响测试精度。

（2）在路测量

在路测试电阻器的方法如图 4-2 所示。



图 4-2 电阻器的在路测试

采用此方法测量印制电路板上电阻器的阻值时，印制电路板不得带电（即断电测试），而且还应对电容器等储能元件进行放电。通常，需对电路进行详细分析，估计某一电阻器有可能损坏时，才能进行测试。此方法常用在维修中。

例如，怀疑印制电路板上的某一只阻值为 $10k\Omega$ 的电阻器烧坏时，可以采用此方法。将万用表的量程开关拨至 $R \times 1k\Omega$ 挡，在万用表调零，并在排除该电阻器没有并联大容量的电容器或电感器等元件的情况下，把万用表的红、黑表笔并联在 $10k\Omega$ 电阻器的两个焊

盘(又叫焊接点)上,若指针指示值接近(通常是略低一点) $10\text{k}\Omega$,则可排除该电阻器出现故障的可能性;若指示的阻值与 $10\text{k}\Omega$ 相差较大,则该电阻器有可能已经损坏。为了证实这一点,可将这只电阻器的一个引脚从焊盘上焊脱(也可将印制线条割断),再进行开路测试,以判断其好坏。

2. 电位器的测量

电位器是一种机电元件,它靠电刷在电阻上滑动,取得与电刷位移成一定关系的输出电压。

用万用表测试电位器的方法如图4-3所示。黑表笔接上抽头;红表笔接中抽头;红表笔以下下抽头。

测试电位器时,应首先测试其阻值是否正常,即用红、黑表笔与电位器的上、下抽头相接触,观察万用表指示的阻值是否与电位器外壳上的标称值一致。然后,再检查电位器的中抽头与电阻体的接触情况,如图4-3所示,一只表笔接中抽头,另一只表笔接上抽头(或下抽头),慢慢地将旋转轴从一个极端位置旋转至另一个极端位置,被测电位器的阻值则应从0(或标称值)连续变化到标称值(或0)。

在旋转转轴的进程中,若万用表指针平稳移动,则说明被测电位器是正常的;若指针抖动(左右跳动),则说明被测电位器有接触不良现象。

图4-3所示为一只线绕电位器。电位器的种类很多,掌握了测试方法,测试其他种类的电位器时也就得心应手了。

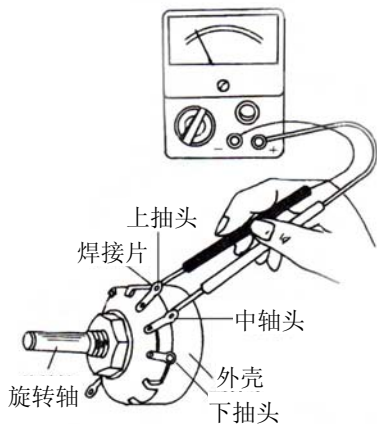


图4-3 万用表测试电位器

4.3 电容的测量

能储存正、负电荷的容器叫电容器,它由两个相互靠近的平板导体,中间夹着一层不导电的绝缘介质组成。或者说,凡是由绝缘物质隔开的两个导体的组合,便构成一个电容器。因此,广义上在很多地方都存在着电容器。

电容器用字母 C 表示,其基本单位为 F (法拉),常用单位 μF (微法)和 pF (皮法)。

电容器的种类很多,按电容器的容量是否可调分类,可分为固定电容器、可变电容器和微调电容器。按绝缘介质分类,可分为空气介质电容器、云母电容器、纸介电容器、小型金属化电容器、瓷介电容器和电解电容器等。

电容器在电路中多用来滤波、隔直、耦合交流、旁路交流及与电感元件构成振荡电路等，是电路中应用最多的元件之一。

4.3.1 电容的参数和标注方法

1. 电容的参数

电容器的参数主要有以下几项。

(1) 标称电容量 C_R 和允许误差 δ 。标注在电容器上的电容量称为标称电容量 C_R ；电容器的实际电容量与标称电容量的允许最大偏差范围，称为允许误差 δ 。

(2) 额定工作电压。这个电压是指在规定的温度范围内，电容器能够长期可靠工作的最高电压，可分为直流工作电压和交流工作电压。

(3) 漏电电阻和漏电电流。电容器中的介质并不是绝对的绝缘体，或多或少总有些漏电。除电解电容外，一般电容的漏电电流很小。显然，电容器的漏电电流越大，绝缘电阻就越小。当漏电电流较大时，电容器会发热，发热严重时，会损坏电容器。常用电解电容的允许漏电电流和相应的漏电电阻值如表 4-2 所示。

表 4-2 常用电解电容器的允许漏电电流和相应的漏电电阻值

耐压 (V)	容量 (μF)	允许漏电电流 (mA)	相应的漏电电阻 (kΩ)	万用表测量挡
6	200	0.2~0.4	15~30	$R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$
6	500	0.4~0.6	10~15	
15	100	0.2~0.5	30~75	
15	200	0.4~0.6	25~40	
25	30	0.2~0.6	40~120	$R \times 1k\Omega$ 或 $R \times 10k\Omega$
25	50	0.2~0.8	30~120	
25	100	0.3~0.8	40~80	
50	20	0.2~0.5	100~250	
50	30	0.2~0.6	80~250	
50	100	0.5~1.0	50~100	
150	30	0.5~0.9	170~300	
150	50	0.6~1.0	150~250	
300	20	0.55~0.9	330~550	$R \times 1k\Omega$ 或 $R \times 10k\Omega$
300	30	0.7~1.2	250~450	
450	10	0.5~0.75	600~900	
450	20	0.7~1.2	370~420	
450	30	1.0~1.5	300~450	

(4) 损耗因数。电容器的损耗因数定义为损耗功率与存储功率之比，用 D 表示。 D 值

越小, 损耗就越小, 电容的质量也越好。

2. 电容规格的标注方法

电容器的标注方法同电阻器的标注方法一样, 有直标法和色标法两种。

直标法将主要参数和技术指标直接标注在电容器表面上。电容量的单位分别为 F、 μF 、pF, 允许误差直接用百分数表示。但是, 有的国家常用一些符号标明单位, 例如 3.3pF 标记为“3p3”, 3300 μF 标记为“3m3”。

电容器的色标法与电阻器的色标法相同。

4.3.2 电容的测量方法

1. 万用表对电容器的粗测

电容器最基本的特性是能储存电荷, 其工作过程即为充放电的过程。用万用表粗测电容器, 就是观察它有无充放电现象, 原理如图 4-4 所示。

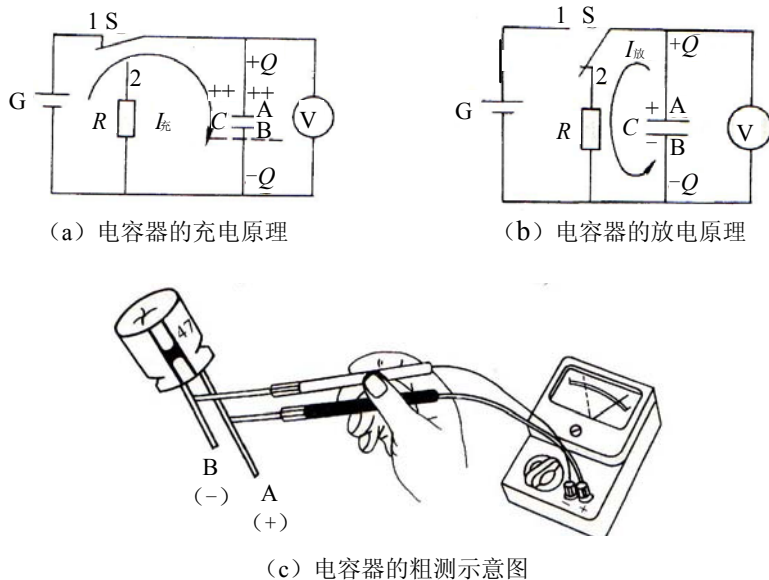


图 4-4 电容器充放电原理及其粗测方法

图 4-4 (a) 所示为电容器的充电原理。G 为直流电源, R 为放电限流电阻, C 为待充电电容器。当把开关 S 置于“1”端时, 电容器 C 的两极与电源 G 相接。在电场的作用下, 电源负极的自由电子移动到电容器的 B 极板, B 极板带负电荷。与此同时, A 极板上的自由电子移动到电源正极, 使 A 极板出现与 B 极板等量的正电荷。这样, 在电容器 C 的两

极就建立了电场。即使撤去电源，由于电容器中间的绝缘介质，这些电荷仍互相吸引而不会自行跑掉，即在电容器上储存了一定的电能，这就是电容器的充电。如果用电压表去测试，能看到电压表有指示（但不能持久，且电压下降得很快）。电容器充电的规律是开始时充电速度快，充电电流大；随后充电速度变慢，充电电流逐渐减小，直至接近于零。

图 4-4（b）所示为电容器的放电原理。当开关 S 置于“2”端时，断开电源，使 C 与 R 构成回路，此时 A 极板上的正电荷经 R 运动到 B 极板，与 B 极板上的负电荷中和，C 上的电场和电压也随之消失。电容器开始放电时电流大，随后逐渐变小。

综合上述原理，得出电容器的一个重要特性，即电容器两端的电压不能突变。也就是说，电容器上的储存电荷既不是瞬间充上的，也不是瞬间放尽的，而是需要经过一段时间才能充满或放完的。放电过程通常用时间常数 τ （单位：s）来表示

$$\tau = RC$$

式中， τ ——电容器充放电时间常数（s）；

R——充放电限流电阻阻值（ Ω ）；

C——电容器的容量（F）。

图 4-4（c）所示为电容器的粗测示意图。所谓粗测是指对电容器能否储存电荷进行大概的测试。运用上述的电容器充放电原理，通过观察万用表指针的偏转角度，来粗略估计电容器的容量。测试时，应根据被测电容器的容量来选择万用表的电阻挡，详见表 4-3。

表 4-3 达式测量电容器时对万用表电阻挡的选择

名 称	电容器的容量范围	所选万用表欧姆挡
小容量电容器	5000pF 以下、0.02 μ F、0.033 μ F、0.1 μ F、0.33 μ F、0.47 μ F 等	$R \times 10k\Omega$ 挡
中等容量电容器	4.7 μ F、3.3 μ F、10 μ F、33 μ F、22 μ F、47 μ F、100 μ F	$R \times 1k\Omega$ 挡或 $R \times 100\Omega$ 挡
大容量电容器	470 μ F、1000 μ F、2200 μ F、3300 μ F 等	$R \times 10\Omega$ 挡

2. 电容器性能的测试

对于小容量电容器而言，其性能可从以下 5 个方面来考察。

（1）测试时万用表指针摆动一下后，很快返回到“ ∞ ”处，说明这只电容器性能正常。

（2）万用表指针摆动一下后不回到“ ∞ ”处，而是指在某一阻值上，则说明这只电容器漏电。这个阻值就是该电容器的漏电电阻的阻值，这样的电容器容量下降。正常的小容量电容器漏电电阻的阻值很大，约为几十至几百 $M\Omega$ 。若漏电电阻的阻值小于几 $M\Omega$ 时，该电容器就不能再使用了。

（3）接好万用表的表笔，但指针不摆动，仍停留在“ ∞ ”处，说明此电容器内部开路。

但容量小于 5000pF 的小容量电容器则是由于充放电不明显所致，不能视为内部开路。

(4) 万用表指针摆到“0”处不返回，说明该电容器已击穿短路，不能再用。

(5) 万用表指针摆动到该表中间某一位置后停止，交换表笔再测时指针仍指在这一位置，如同是在测试一只电阻器，则说明该电容器已经失效，不可再用。

3. 电解电容器极性的判断

电解电容器的介质是一层极薄的附着在金属极板上的氧化膜。氧化膜如同半导体二极管一样，具有单向导电性，因此，在将电解电容器接入电路使用时，应将它的正极引线接高电位，负极引线接低电位。这相当于在电容器上施加一个反向电压，使其漏电电流小，而漏电阻大；反之，如果将电解电容器的正极引线接低电位，负极引线接高电位，则会使它的漏电电流大，漏电阻小，这样会导致电解电容器在使用中过热，从而击穿漏液，甚至发生爆炸。

为了防止在使用中接错极性，通常在电解电容器的引脚旁标明正极(+)和负极(-)。但有时“+”、“-”极性标志模糊不清，这种情况下可根据电解电容器正向漏电阻大于反向漏电阻的特点，用万用表的电阻挡进行判断。

先任意测一下电容器的漏电阻值，记下其大小。然后将电容器两个引脚相碰短路放电后，再交换表笔进行测量，读出漏电阻值。比较两次测出的漏电阻值，以阻值较大的那一次为准。黑表笔所接的引脚为电解电容器的正极，红表笔所接的则为其负极。

如果通过两次测量比较不出漏电阻值的大小，可通过多次测量来判断被测电容器的极性。但是，如果万用表的电阻挡量程挡位选得太低，两个阻值较大且互相接近时，须更换到量程较大的挡位进行测量。

4.4 电感的测量

电感器俗称电感线圈，是指用漆包线绕在绝缘管或铁芯、磁芯上的一种元件。它被称作电工的3大器件（电阻器、电容器、电感器）之一，是组成电路的基本元件。

电感器在有直流电通过时，其周围会产生磁场；当有交流电通过它时，不仅会产生磁场，而且线圈还具有感抗的性质，如同电阻器一样对交变电流有阻碍作用。

电感器的主要参数有电感量、品质因数、标称电流及分布电容等。按频率范围可将电感器分为高频电感器、中频电感器和低频阻流电感器等。

测量电感器的参数需要用专用仪器（如交流电桥、Q表等），在不具备专用仪器的情况下，可借助万用表进行测试，这样也能获得一些可靠的参数，并做出正确的判断。

4.4.1 电感的主要参数

1. 电感量 L

线圈的电感量 L 也叫自感系数或自感，是表示线圈产生自感应能力的一个物理量。当线圈中及其周围不存在铁磁物质时，通过线圈的磁通量与其中流过的电流成正比，其比值称为线圈的**电感量**。电感量的单位为亨利（H），常用单位有毫亨（mH）和微亨（ μH ）。

2. 品质因数 Q

线圈的品质因数 Q 也叫 Q 值，是表示线圈品质质量的一个物理量。它是指线圈在某一频率的交流电压下工作时，所呈现的感抗与其等效损耗电阻之比，即：

$$Q = \omega L / R = 2\pi f L / R$$

式中， R 为被测电感在频率 f 时的等效损耗电阻， ω 为 ω 。

在谐振电路中，线圈的 Q 值越高，回路的损耗就越小，因而电路的效率就越高。线圈 Q 值的提高往往受一些因素的限制，如导线的直流电阻、线圈骨架的介质损耗、屏蔽罩或铁芯引起的损耗及高频趋肤效应的影响等。线圈的 Q 值通常为几十至几百。

3. 分布电容

线圈的匝与匝间、线圈与屏蔽罩间、线圈与磁芯和底板间存在的电容，均称为分布电容。分布电容的存在使线圈的 Q 值减小，稳定性变差，因此线圈的分布电容越小越好。

4.4.2 电感量的测试

取一只调压器TA、被测电感器 L_X 和一只电位器 R_P ，按图 4-5 所示接线，便构成了一个电感量测试电路。

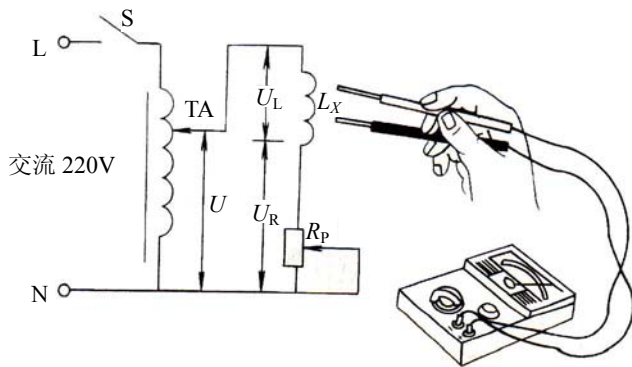


图 4-5 电感量的测试

调节电位器 R_p 使得其阻值为 3140Ω ，闭合开关 S ，调节调压器 TA ，使 $U_R=10V$ ，通过以下公式便可计算出被测电感器的电感量。

$$L_x = \frac{R_p}{100\pi} \cdot \frac{U_L}{U_R} = \frac{3140}{100 \times 3.14} \times \frac{U_L}{10} = U_L$$

这就是说，在上述条件下， L_x 上的压降数值就是它的电感量数值。如果万用表测出 U_L 单位为 V （伏特），则电感量的单位就是 H （亨利）。由于 H 单位很大，而一般电感器的电感量很小，因此为测试方便，一般宜选用数字万用表的 mV 挡。

对电感量的测量也可以采用估测的方法。一般用于高频的电感器，圈数较少，有的只有几圈，其电感量一般只有几 μH ；用于低频的电感器，圈数较多，其电感量可达数千 μH ；而用于中频段的电感器，电感量为几百 μH 。了解这些，对于用万用表所测得的结果具有一定的参考价值。

4.4.3 交流电桥法测量电感

测量电感的交流电桥有马氏电桥和海式电桥两种，分别适用于测量品质因数不同的电感。

(1) 马氏电桥

如图 4-6 (a) 所示，由电桥平衡条件可得

$$\begin{aligned} L_x &= \frac{R_2 R_3 C_n}{1 + \frac{1}{Q_n^2}} \\ R_x &= \frac{R_2 R_3}{R_n} \left(\frac{1}{1 + Q_n^2} \right) \\ Q_x &= \frac{1}{\omega R_n C_n} = Q_n \end{aligned}$$

式中， L_x ——被测电感；

R_x ——被测电感的损耗电阻。

一般在马氏电桥中， R_3 用开关连接，可进行量程选择， R_2 和 R_n 为可调标准元件。从 R_2 的刻度可直接读出 L_x 的值；由 R_n 的刻度可直接读出 Q_x 的值。马氏电桥适用于测量 $Q < 10$ 的电感。

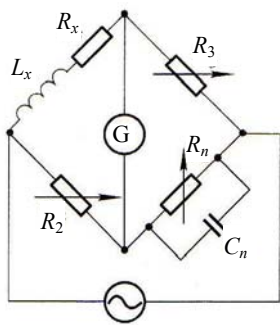
(2) 海氏电桥

如图 4-6 (b) 所示，同样由电桥平衡条件可得，

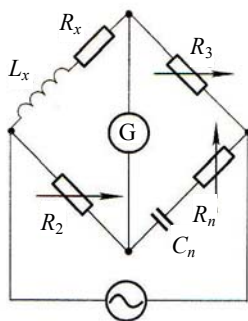
$$L_x = \frac{R_2 R_3 C_n}{1 + \frac{1}{Q_n^2}}$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_n} \left(\frac{1}{1 + Q_n^2} \right)$$

$$Q_x = \frac{1}{\omega R_n C_n} = Q_n$$



(a) 马氏电桥



(b) 海氏电桥

图 4-6 交流电桥测量电感

海氏电桥与马氏电桥一样，由 R_3 选择量程，从 R_2 的刻度可直接读出 L_x 的值，由 R_n 的刻度可直接读出 Q_x 的值。海氏电桥适用于测量 $Q > 10$ 的电感。

用电桥测量电感时，首先应估计被测电感的 Q 值以确定电桥的类型；再根据被测电感量的范围选择量程，然后反复调节 R_2 和 R_n ，使检流计 G 的读数最小，这时即可从 R_2 和 R_n 的刻度读出被测电感的 L_x 值和 Q_x 值。

电桥法测量电感一般适用于测量低频用电感，尤其适用于有铁芯的大电感。

4.4.4 万用表对电感器好坏的测试

在家用电器的维修中，如果怀疑某个电感器有问题，通常是用简单的测试方法来判断它的好坏。

可以通过数字万用表来测试电感器。首先要将数字万用表的量程开关拨至“通断蜂鸣”符号处，用红、黑表笔接触电感器两端。如果阻值较小，表内蜂鸣器就会鸣叫，表明该电感器可以正常使用。

也可以用普通万用表来测试电感器。当怀疑电感器在印制电路板上开路或短路时，可采用万用表的 $R \times 10\Omega$ 挡，在停电的状态下，测试电感器 L_x 两端的阻值。一般高频电感器的直流内阻在零点几到几欧姆之间；低频电感器的内阻在几百欧姆至几千欧姆之间；中频电感器的内阻在几欧姆到几十欧姆之间。测试时要注意，有的电感器圈数少或线径粗，直流电阻很小，即使使用 $R \times 1\Omega$ 挡进行测试，阻值也可能为零，这属于正常现象（可用数字万

用表测量)。如果阻值很大或无穷大时,表示该电感器已经开路。

4.5 半导体二极管的测量

晶体二极管亦叫半导体二极管,简称二极管。它有两个电极,即正极和负极,具有单向导电特性,即正向运用时能导通,反向运用时截止。

晶体二极管的种类较多,按材料的不同可分为锗二极管、硅二极管、砷化镓二极管等;按结构的不同可分为点接触二极管、面接触型二极管等;按用途的不同可分为检波二极管、整流二极管、稳压二极管等。

4.5.1 半导体二极管的特性和主要参数

1. 二极管的主要特性

二极管的最主要特性是单向导电性,即二极管正向偏置时导通;反向偏置时截止。

2. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_{FM} 。 I_{FM} 指管子长期工作时,允许通过的最大正向平均电流。流过的PN结电流太大,PN结会发热,超过一定的极限会烧坏二极管,在实际应用时工作电流必须小于 I_{FM} 。最大整流电流是反映正向特性的主要参数。

(2) 反向电流 I_{R} 。 I_{R} 指在一定温度条件下,二极管承受了反向工作电压、又未被反向击穿的反向电流值。反向电流越小,表明管子的单向导电性越好。

(3) 反向最大工作电压 V_{RM} 。 V_{RM} 指管子运行时允许承受的最大反向电压, V_{RM} 应小于反向击穿电压。

(4) 直流电阻。直流电阻指二极管两端所加的直流电压与流过它的直流电流之比。良好的二极管的正向电阻约为几十欧姆到几千欧姆;反向电阻大于几十千欧到几百千欧。

(5) 交流电阻 r 。二极管特性曲线工作点Q附近电压的变化量与相应电流变化量之比。

(6) 二极管的极间电容。势垒电容与扩散电容之和称为极间电容。二极管在低频工作时,二极管的极间电容较小,可以忽略;在高频工作时,必须考虑其影响。

I_{FM} 、 V_{RM} 的值通常由器件手册查得, I_{R} 、 r 的值可以用晶体管图示仪测得。

4.5.2 半导体二极管的测量

PN结的单向导电性是进行二极管测量的根本依据。

1. 用模拟式万用表测量二极管

用模拟式万用表欧姆挡测量二极管时，万用表面板上标有“+”号的端子接红色表笔，对应于万用表内部电池的负极；标有“-”号的端子接黑色表笔，对应于万用表内部电池的正极。

测量小功率二极管时，万用表置“ $\times 100\Omega$ ”挡或“ $\times 1k\Omega$ ”挡。万用表的“ $\times 1\Omega$ ”挡的输出电流过大，“ $\times 100k\Omega$ ”挡的输出电压过大，两者都可能损坏被测二极管，对于面接触型大电流整流二极管可用“ $\times 1\Omega$ ”或“ $\times 10k\Omega$ ”挡位进行测量。

测量时，将二极管与万用表的表笔相接，万用表指示出一个电阻值；将万用表表笔对换再接二极管，此次所测得的电阻必然与上次测量结果不相等。其中万用表指示的较小电阻值为二极管的正向电阻，一般为几百欧姆到几千欧姆。此时，黑表笔所接端为二极管的正极；红表笔所接端为二极管的负极。万用表指示的较大电阻为二极管的反向电阻，对于锗管，反向电阻在 $100k\Omega$ 以上；硅管的反向电阻很大，几乎看不出表针的偏转。用这种方法可以判断二极管的好坏和极性。

普通二极管的测试方法。根据正常的二极管正向电阻值较小，反向电阻值较大的特征，用万用表的 $R \times 1k\Omega$ 挡来判断被测二极管的好坏。

测试二极管的正向电阻值时，用万用表的红表笔接二极管的负极，黑表笔接二极管的正极（注：在万用表内部，黑表笔与表内电池正极相连，电池负极同表头与红表笔相连），此时二极管的电阻值较小，锗二极管为 $1k\Omega$ 左右，硅二极管为 $4 \sim 8k\Omega$ 。

二极管的反向电阻的测试方法是万用表的量程开关仍拨至 $R \times 1k\Omega$ 挡，红表笔接二极管正极，黑表笔接二极管负极。此时，好的锗二极管的反向电阻在 $100k\Omega$ 以上，硅二极管的反向电阻为无穷大。

二极管的正、反向电阻值，两者相差越大越好，即正向电阻值要小，反向电阻值要大。若是正反向电阻值都是无穷大，说明二极管内部断线开路或烧断；若二极管正反向电阻均为零，则表明两个电极已短路（PN 结击穿）；如果测得的正、反向电阻很接近，表明二极管失去单向导电特性（又叫失效），是不能使用的。

2. 用数字式万用表测量二极管

一般数字式万用表上都有二极管测试挡。例如，DT890D型数字万用表，其测试原理与采用模拟式万用表测量电阻完全不同，它实际上测量的是二极管的直流电压降。当二极管的正负极分别与数字万用表的红黑表笔相接时，二极管正向导通，万用表上显示出二极管的正向导通电压 U_D 。若二极管的正负极分别与数字万用表的黑红表笔相接，二极管反向偏置，则表上显示出一个固定电压值，约为 $2.8V$ 。

3. 用晶体管图示仪测量二极管

晶体管图示仪可以显示二极管的伏安特性曲线。例如，测量二极管的正向伏安特性曲

线, 首先把图示仪荧光屏上的光点置于坐标左下角, 峰值电压范围置 $0\sim 20\text{V}$, 集电极扫描电压极性置于“+”, 功耗电阻置 $1\text{k}\Omega$, X 轴集电极电压置“ $0.1\text{V}/\text{度}$ ”, Y 轴集电极电流置“ $5\text{mA}/\text{度}$ ”, Y 轴倍率置“ $\times 1$ ”, 将二极管的正负极分别接在面板上的 C 和 E 接线柱上, 缓慢调节峰值电压旋钮, 即可得到二极管正向伏安特性曲线。从屏幕显示图可以直接读出二极管的导通电压。

4. 万用表对晶体二极管正负极的判断

二极管的反向电阻值远大于其正向电阻值, 据此可判断出它的正极和负极。

将万用表的量程开关拨至 $R\times 1\text{k}\Omega$ 挡, 两支表笔分别接在二极管的正向电阻值和反向电阻值。若测得电阻值为几百欧姆至几千欧姆, 说明这是正向电阻, 这时万用表的黑表笔接的是二极管的正极, 红表笔接的是二极管的负极。

值得一提的是, 二极管是非线性元件, 其正向电压与正向电流不成正比。若是将万用表的量程选择在 $R\times 100\Omega$ 挡, 或 $R\times 10\Omega$ 、 $R\times 1\Omega$ 挡, 则通过二极管的正向电流依次增大, 正向电阻值也逐渐减小, 但二者并不成反比关系。所以万用表选择的量程挡位不同, 测出的电阻值也就不同。

4.6 半导体三极管的测量

半导体三极管是内部含有两个 PN 结、外部具有 3 个电极的半导体器件。由于它的特殊结构, 在一定条件下具有“放大”和“开关”作用, 因此被广泛应用于各种电子设备中。

4.6.1 三极管的主要参数

表征晶体管性能的电参数很多, 可分为两大类, 一类是运用参数, 表明三极管在一般工作时的参数; 另一类是极限参数, 表明三极管的安全使用范围。前者主要包括电流放大系数、截止频率、击穿电流等; 后者包括击穿电压、集电极最大允许电流、集电极最大耗散功率等。

(1) 直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 定义为集电极直流电流 I_{CQ} 与基极直流电流 I_{BQ} 的比值。

(2) 交流电流放大系数 β 。三极管在有信号输入时, 交流电流放大系数 β 定义为集电极电流的变化量 ΔI_{c} 与基极电流的变化量 ΔI_{b} 之比。

(3) 穿透电流 I_{CEO} 。 I_{CEO} 是基极 b 开路, 集电极 c 与发射极 e 间加反向电压时的集电极电流。硅管的 I_{CEO} 在几微安以下。

(4) 反向击穿电压 $V_{(BR)CEO}$ 。 $V_{(BR)CEO}$ 是基极 b 开路, 集电极 c 与发射极 e 间的反向击穿电压。

(5) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。 I_{CM} 是 β 值下降到额定值的 1/3 时所允许的最大集电极电流。

(6) 集电极最大允许功耗 P_{CM} 。 P_{CM} 是集电极上允许消耗功率的最大值。

$V_{(BR)CEO}$ 、 I_{CM} 、 P_{CM} 的值可由器件手册查得, $\bar{\beta}$ 、 β 、 I_{CEO} 的值可用晶体管图示仪测得。

4.6.2 三极管的测量

1. 用模拟万用表判别管脚

无论是 NPN 型三极管还是 PNP 型三极管, 其内部都存在两个 PN 结, 即发射结 (b-e) 和集电结 (c-b), 基极处于公共位置。利用 PN 结的单向导电性, 用前面介绍的判别二极管极性的方法, 可以很容易地用模拟万用表找出三极管的基极, 判断其导电类型是 NPN 型还是 PNP 型。

(1) 基极的判别。以 NPN 型三极管为例说明测试方法。用模拟万用表的欧姆挡, 选择 “ $\times 1k\Omega$ ” 挡或 “ $\times 100\Omega$ ” 挡, 将红表笔插入万用表的 “+” 端, 黑表笔插入 “-” 端, 首先选定被测三极管的一个引脚, 假定它为基极, 将万用表的黑表笔固定接在上面, 红表笔分别接另两个引脚, 得到两个电阻值; 然后再将红表笔与该假设基极相接, 用黑表笔分别接另两个引脚, 又得到两个电阻值。若第一次测量的电阻值较小, 第二次测量的电阻值较大, 说明假设的基极是正确的; 否则假设的基极是错误的, 应重新假设别的脚为基极, 重复上述步骤, 直到出现符合上述电阻的情况为止。

当基极判断出来后, 由测得的电阻值的大小还可知道该三极管的类型。当黑表笔接基极时, 若测的两个电阻较小, 红表笔接基极时测得的两个电阻值较大, 则此三极管是 NPN 型三极管; 反之, 则为 PNP 型三极管。

对于一些大功率三极管, 其允许的工作电流很大, 可达安培数量级, 发射结面积大, 杂质浓度较高, 造成基极-发射极的反向电阻不是很大, 但还是能与正向电阻区分开来。可选用万用表 “ $\times 1\Omega$ ” 挡或 “ $\times 10\Omega$ ” 挡进行测试。

(2) 发射极和集电极的判别。判别发射极和集电极的依据是: 发射极的杂质浓度比集电极的杂质浓度高, 因而三极管正常运用时的 β 值比倒置运用时要大得多。

下面以 NPN 管为例说明测试方法。

用模拟式万用表, 将黑表笔接假设的集电极, 红表笔接假设的发射极, 在假设集电极 (黑表笔) 与基极之间接一下 $100k\Omega$ 左右的电阻, 看万用表指示的电阻值, 如图 4-7 (a) 所示。然后将红黑表笔对调, 仍在黑表笔与基极之间接一下 $100k\Omega$ 左右的电阻, 观察万用

表指示的电阻值,如图4-7(b)所示。其中,万用表指示电阻值小表示流过三极管的电流大,即三极管处于正常运用的放大状态,则此时黑表笔所接的一端为集电极,红表笔所接的一端为发射极。

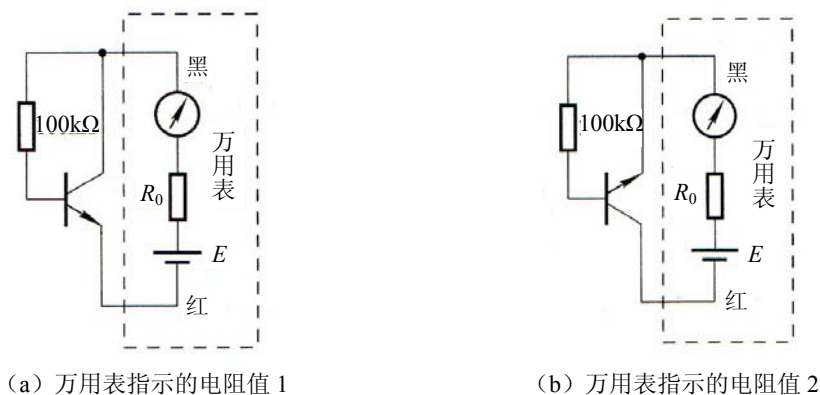


图 4-7 判断三极管 b、e 的测量图

一般数字式万用表都有测量三极管的电路(例如 DT890D 型数字万用表),在已知 NPN 和 PNP 型后,依据三极管正常使用处于放大状态时 β 值较大的特点,可以判别发射极和集电极。

2. 用晶体管特性图示仪测量三极管

用万用表只能估测三极管的好坏,而用晶体管特性图示仪可以测得三极管的多种特性曲线和相应的参数,以直观地判断三极管的性能。

3. 万用表对晶体三极管电流放大系数 β 的测试

晶体三极管具有放大性能,这是由它的内部结构所决定的。用晶体三极管组成的放大电路有多种,但用得最多的是共发射极放大电路,所以这里介绍此种电路的电流放大系数 β 值(俗称放大倍数)的测试。

以测试 PNP 型晶体三极管为例。将万用表的量程开关拨至 $R \times 1k\Omega$ 挡,红表笔接集电极 c,黑表笔接发射级 e,测出阻值。再在集电极 c 与基极 b 之间接入一只阻值为 $100k\Omega$ 电阻,这时万用表指示的阻值变小,阻值约在 $10k\Omega$ 左右。我们希望此时阻值越小越好,阻值越小则表明被测晶体三极管的 β 值越大,即放大能力越强。

对于 NPN 型晶体三极管 β 值的判断,只需将两表笔交换测试即可。

4. 万用表对集电极-发射极穿透电流 I_{CEO} 的测试

以测试 PNP 型晶体三极管为例。将万用表的量程开关拨至 $R \times 1k\Omega$ 挡,红表笔接集电极,

黑表笔接发射极, 观看万用表指示值在 $100\text{k}\Omega$ 以上, 希望此值越大越好。指示的阻值小, 表明晶体三极管的穿透电流 I_{CEO} 太大, 这种晶体三极管的性能差, 不可用。

测试 NPN 型晶体三极管的方法与上述方法相同, 只是表笔反接。

4.7 小 结

本章介绍了电阻、电容、电感、半导体二极管及半导体三极管等元器件参数的表示; 重点介绍了其测量原理和使用测量仪器对其测量的方法。

学完本章后, 要求大家掌握万用表测量电阻、电容及电感的量值; 掌握万用表判断电容的极性和电感器的好坏; 掌握万用表测量二极管的极性以及三极管参数的测量。

4.8 思考题

1. 使用电阻器时要考虑哪些问题?
2. 电解电容的漏电流与所加电压有关吗? 为什么?
3. 一个电解电容器的“+”、“-”极标志已经脱落, 如何用万用表去判定它的“+”、“-”极?
4. 如何判断二极管的“+”、“-”极?
5. 简述三极管极性的判断方法。

第 5 章 模拟量的测量及仪器

5.1 概 述

电压、电流和功率是电能量的 3 个基本参数。这 3 个基本参数的测量，在电子测量中占有重要的地位。尤其是电流，它是电子设备消耗功率的主要参数，也是衡量单元电路和电子设备工作安全情况的一个主要参数。

电流按电路频率可分为直流、工频、低频、高频和超高频电流。测量电流时，除要注意其量值大小外，还要注意其频率的高低。

电压测量是其他许多电参数，也包括非电参数测量的基础，是相当重要的一种参数测量。许多电参数，如频率特性、增益、失真度及噪声等也可视为电压的派生量。

5.2 直流电流的测量

直流电流的测量，一般用在控制系统及直流供电的设备系统中。

5.2.1 直流电流测量的一般方法

在电子电路中，直流电流的测量一般采用直接测量法和间接测量法。

直流电流采用间接测量的原因主要有以下两个：

(1) 模拟式电流表的阻抗不能做到很小，更不可能接近于零。所以，将电流表串入被测电路测量电流时，电流表本身的内阻将给电路带来一定的影响。

(2) 电流的直接测量必须将电流表串联在电路中，这样，为了测定电流，必须断开电路，这就给测量带来了麻烦。

测量直流电流可采用模拟直流电流表、模拟万用表及数字万用表等仪表。

5.2.2 模拟直流电流表的工作原理

(1) 磁电式仪表测量直流电流的工作原理

直流电流表多数为磁电式仪表，磁电式表头主要由可动线圈、游丝和永久磁铁组成。线圈框架的转轴上固定了读数指针，当线圈中流过电流时，在磁场的作用下，可动线圈发生偏转，带动上面固定的读数指针偏转，偏转的角度为：

$$\alpha = S_I \cdot I$$

式中， α ——指针偏转角；

S_I ——电流灵敏度；

I ——线圈中流过的电流。

电流灵敏度 S_I 由仪表结构参数决定，对于一个确定仪表来说，它是一个常数。因此，指针的偏转角与通过可动线圈的电流 I 成正比。

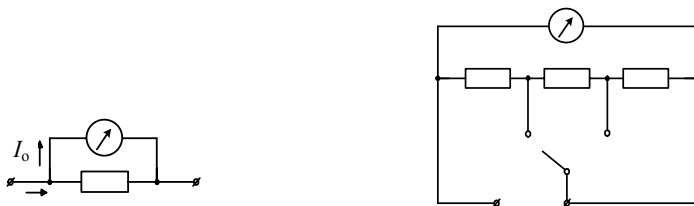
由上式可以看出，表头本身可直接作为电流表使用。但直接采用表头测量，只能测量直流电流。因为如果可动线圈中通入交流电流，指针会随电流的变化左右摇摆。若通入电流的频率较高，则摆频率变高，不但无法读数，还可能由于发热，对偏转机构造成损坏。

(2) 磁电式仪表的量程扩展

从磁电式仪表的工作原理可以看出，不增加测量线路，磁电式仪表是可以直接测量直流电流的。但由于被测电流要通过游丝和可动线圈，被测电流的最大值只能限制在几十微安到几十毫安之间，要测量大电流，就需要另外加接分流器。

图 5-1 (a) 为单量限的电流表。A、B 为电流表的接线端， R 为一个并联在磁电式测量机构上的分流电阻。被测电流 I_x 从端钮 A 输入，由于 R 的分流作用，只有小部分电流 I_0 从测量机构流过。由于测量机构内阻 R_g 是已知的，允许通过的电流 I_0 由可动线圈的线径及游丝决定，故可根据被测电流 I_x 的大小设计 R 的大小。

多量限的电流表则是在单量限电流表的基础上加上不同的分流电阻所构成的。如图 5-1 (b) 所示。当开关 S 不接通时，分流电阻最大，为 $(R_1 + R_2 + R_3)$ ；当开关 S 接通 1 点与 2 点时，分流电阻为 $(R_2 + R_3)$ ；当开关 S 接通 1 点与 3 点时，分流电阻最小，为 R_3 。可见，量程的扩大是通过并联不同的分流电阻实现的，这种电流表的内阻随量程的大小而不同。量程越大，测量机构流过的电流越大，分流电阻越小，电流表对外显示的总内阻也越小。



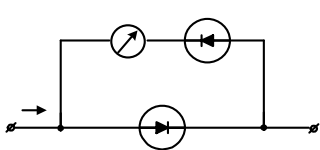
(a) 单量限电流表示意图

(b) 多量限电流表示意图

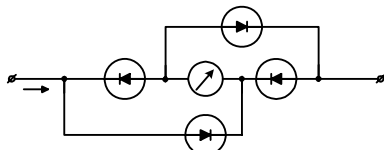
图 5-1 电流表的量程扩展图

(3) 整流式表头的工作原理

磁电式仪表的表头不能直接用来测量交流电参数, 因为其可动部分的惯性较大, 跟不上交流电流流过表头线圈所产生的转动力矩的变化, 故不能指示交流电的大小。若把交流电转换成单方向的直流电, 让直流电流通过表头, 则表针偏转角的大小就间接反映了交流电的大小。把交流电转变为直流电可采用整流电路, 常用的整流电路有半波整流和全波整流, 如图 5-2 所示。



(a) 半波整流式表头



(b) 全波整流式表头

图 5-2 整流式表头原理图

在图 5-2 (a) 中, 当电路加入正弦信号时, 在交流信号的正半周二极管 V_2 导通、 V_1 截止; 负半周 V_1 导通、 V_2 截止, 在一个周期内只有半个周期的电流流过表头。

在图 5-2 (b) 中, 当电路加入正弦信号时, 在交流信号的正半周二极管 V_3 、 V_4 导通, V_1 、 V_2 截止; 负半周 V_1 、 V_2 导通, V_3 、 V_4 截止。在 R_g 个周期内信号全部流过表头, 比图 5.2 (a) 的电路效率高。

由于磁电式表头可动部分的惯性作用, 表头指针只能反映脉动电流的平均值, 而不能反映脉动电流的瞬时值, 所以仪表指针的偏转角指示的是交流信号整流后的脉动直流的平均值的大小。

在实际工作中, 人们常用正弦有效值刻度定义表盘。因此, 一般通过电路, 将交流信号平均值换算成有效值, 再由表头指示。

5.2.3 数字式万用表测量直流电流的原理

数字式万用表的测量过程是先通过转换电路将被测量 V_2 转换成直流电压信号, 由模/数 (A/D) 转换器将电压模拟量变成数字量, 然后通过电子计数器计数, 最后把测量结果用数字直接显示在显示器上。测量过程如图 5-3 所示。



图 5-3 数字式万用表的测量过程

数字式万用表直流电流挡的基础是数字式电压表，它是通过电流—电压转换电路，使被测电流通过标准电阻而将电流转换成电压来进行测量的。电流—电压转换电路如图 5-4 所示。

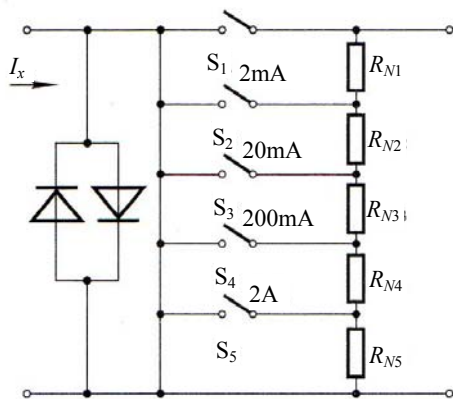


图 5-4 电流—电压转换电路

被测电流 I_x 流过标准采样电阻，在采样电阻 R_N 上产生一个正比于 I_x 的电压， R_N 上的电压经放大器放大后输出，此输出电压就可以作为数字电压表的输入电压来测量。

数字式万用表的直流电流的量程切换可通过不同的取样电阻 R_N 来实现。量程越小，取样电阻就越大。

5.2.4 直流电流的测量方法

直流电流要用直流结构的电流表来测量，不能用交流电流表来测量。

1. 用模拟式万用表测量

模拟式万用表的测量过程是先通过一定的测量电路，将被测量转换成电流信号，再由电流信号驱动磁电式表头指针的偏转，在刻度尺上指示被测量的大小。测量过程如图 5-5 所示。由此可见，模拟式万用表是在磁电式微安表头的基础上扩展而成的。



图 5-5 模拟式万用表测量电流的过程

用模拟式万用表测量直流电流时是将万用表串联在被测电路中的，因此表的内阻可能影响电路的工作状态，使测量产生误差，也可能由于量程不当而烧毁万用表。所以，使用时一定要小心。

2. 用数字式万用表测量

与模拟式万用表测量直流电流一样,数字式万用表同样是将万用表串联在被测电路中。当数字式万用表串联在被测电路中时,取样电阻的阻值会对被测电路的工作状态产生一定的影响,在使用时应注意。

3. 用间接测量法测量直流电流

如果被测支路内有一定值电阻 R 可以利用时,测量该电阻两端的直流电压 U ,然后根据欧姆定律求出被测电流 $I=U/R$ 。由于该电阻与被测元件串联,所以这个电阻 R 一般称为电流取样电阻。当被测支路无现成的电阻可利用时,也可以人为地串入一个取样电阻来进行间接测量,取样电阻的取值原则是对被测电路的影响越小越好,一般在 $1\Omega\sim 10\Omega$ 之间,尽量不超过 100Ω 。

5.3 交流电流的测量

交流或工频(50Hz)的电流测量,一般用在电力系统及电工技术领域。它的主要特点是测量直流值很大,可达数千安培;而高频或低频电流的测量,一般用于电子技术领域,其测量数值为毫安级或安培级。

5.3.1 交流电流测量的一般方法

在电子电路中,交流电流的测量同样可以采用直接测量法和间接测量法。

交流电流的测量可以采用模拟电流表、数字电流表进行间接或直接测量。一般情况下,采用间接测量法更为普遍。因为除了电流表本身内阻大小的影响和断开电路的麻烦,交流电流测量还具有其特有的性质。

(1) 模拟式电流表在直流运用时,可视为一个简单的内阻;而在交流状态下呈现为一个阻抗,电流表在高频运用状态下的等效电路如图 5-6 所示。A 点和 B 点为电流表的输入端, R_0 、 L_0 为电流表本身的电阻和电感, C_0 为 A、B 之间的分布电容, C_1 、 C_2 是对地分布电容。由图可以看出,由于电流本身的电抗分布电容的作用,随着频率增加,阻抗也增大。增大的电抗部分引入的测量误差也增加,从而影响了测量的准确性。

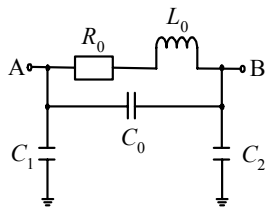


图 5-6 电流表的等效电路

(2) 在超高频段,电路或元件受分布参数的影响,电流的分布也是不均匀的,无法用

电流表来测量各处的电流值。

(3) 利用取样电阻的间接测量法, 可将交流电流的测量转换成交流电压的测量。一切测量交流电压的方法都可用来完成交流电流的测量, 而且还可以利用示波器观察电路中电压和电流的相位关系。用间接法测量交流电流的方法与用间接法测量直流电流的方法相同, 只是对取样电阻有一定的要求。当电路工作频率在 20kHz 以上时, 就不能选用普通线绕电阻作为取样电阻了, 高频时应采用薄膜电阻。

因此, 在测量交流电流时, 只在低频 (45Hz~500Hz) 电流的测量中, 利用交流电压表或具有交流电流测量挡普通万用表或数字万用表串联在被测电路中进行交流的直接测量。一般交流电流的测量都采用间接测量法, 即先利用交流电压表测出电压, 再用欧姆定律换算成电流。

5.3.2 模拟交流电流表的工作原理

1. 磁电式电流表测量交流电流的工作原理

普通磁电式万用表可以测量低频 (45Hz~500Hz) 交流电流, 这是因为在其内部测量电路中加入了一个二极管整流电路, 它将交流电流变成了单方向的脉动电流, 因而磁电式测量机构的指针能够偏转。为了避免指针抖动, 在测量机构两端并联一个电容。此时仪表的偏转取决于被测交流的整流平均值, 但刻度是按正弦有效值刻度的。因此, 普通磁电式万用表只能测量正弦交流电流, 若波形畸变, 则会产生误差。

2. 电磁式电流表测量交流的工作原理

电磁式电流表是测量交流电流最常用的一种仪表, 它具有结构简单、过载能力强、造价低廉以及交直流两用等一系列优点, 在实验室和工程测量中得到了广泛的应用。

电磁式仪表是由一个可动软磁片 (铁芯) 与固定线圈中电流产生的磁场相互吸引而工作的仪表。当线圈中通过被测电流 I 时, 对铁芯产生吸引力或排斥力, 固定在转轴上的铁心转动, 带动指针偏转。可以证明, 指针偏转的角度为:

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

式中, α ——指针偏转角;

L ——线圈自感;

I ——线圈中流过的电流。

如果改变铁芯的形状设计, 使 $\frac{dL}{d\alpha} = \frac{1}{I}$, 则偏转角度与流入电流成正比。

由于可动铁芯受力方向与线圈电流方向无关, 当线圈电流方向改变时, 线圈磁极性和

铁芯磁极性同时改变而保持受力方向不变,因此,电磁式仪表可以测直流电流,也可测交流电流,这是与磁电式仪表不同的地方。

3. 电磁式电流表的量程扩展

由电磁式仪表的工作原理可以看出,电磁式测量机构本身就是电流表,只要将被测电流接到固定线圈中即可。由于固定线圈的线径较粗,可以流入大电流,因而不需要分流器。

需要扩大量程时,可以采用加粗线径和减少匝数的办法。但线径也不能太粗,否则重量太大。

电磁式表头构成多量限电流表时,与磁电式仪表不同,它不宜采用分流器。因为对应一定的电流分配关系,线圈内阻较大时,要求分流器的电阻也较大。因此,仪表工作消耗的功率变大。所以当电磁式表头构成多量限电流表时,通常采用线圈分段串联的办法,例如将线圈分成四段绕制。通过四段的串联、并联或混联可构成 3 个量限的电流表。如图 5-7 所示,设线圈线径允许通过的电流为 I ,则通过串并联可得到 $2I$ 或 $4I$ 的量限。

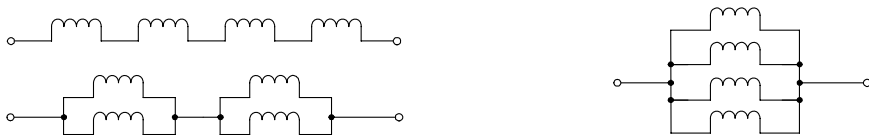


图 5-7 多量限电流表的线路

5.3.3 热电式电流表

1. 热电式电流表的工作原理

热电式电流表的基本原理是通过热电现象,先把高频电流转变为直流电,再测量直流电(常用磁电式电流表)的大小,从而间接地反映出被测高频电流的量值。

将高频电变为直流电的原理是基于一种封闭线路内有直流电产生的现象。这个封闭线路是由两个不同金属元素的导线组成的热电偶。导线的两个焊接处有电动势出现,其大小正比于两焊接点的温度差,且与组成热电偶的材料有关。

根据上述原理可组成热电式电流表,如图 5-8 所示。其中,AB 是一金属导线。当通过电流时,由于电流的热效应,使 AB 导线的温度上升。DCE 是一热电偶,在 DE 之间串接了一只磁电式电流表 G,以此来测量热电偶中的热电流。由于 C 点是焊接在导线 AB 上的,因此当 AB 导线因通

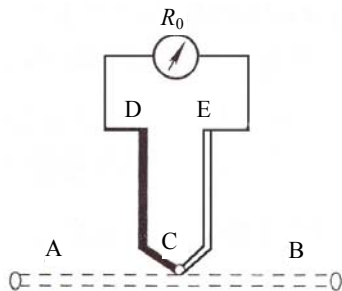


图 5-8 热电式电流表原理图

过电流而温度上升时, C 点的温度也随之上升。而 CD 和 CE 是两种不同材料的导体, 它们的热电特性不同, 在 D、E 两点由于存在温差而产生热电动势。这样热电偶中将产生热电流, 使电流表 G 的指针发生偏转。电流表 G 指针的偏转角度与被测电流的大小有一定的关系, 所以可用此装置来测量高频电流。

由于热电式电表的读数与发热器的功率成正比, 即与流过加热导体的有效值的平方成正比, 所以电表的刻度接近于平方律特性。在这种非线性刻度上, 约有相当于额定电流 20% 的起始部分是无法使用的。这种电表的测量准确度为 1.5%。

在测量 100mA 以下的小电流时, 为了提高灵敏度, 常将热电偶与发热器放在密封的玻璃泡内, 且抽成真空, 使发热器产生的热能比在空气中散发的少, 以保证大部分的热能供给热电偶。在测量大电流时可将热电偶与发热器放在密封的玻璃泡中, 但不必抽成真空。此时密封仅是为了使发热器与热电偶周围的空气不流动, 使热能不被流动的空气带走。

2. 热电式电流表的量程扩展

一般来讲, 热电式电流表的量程不可能太大。因为当加热器要通过强电流时, 必须相应地加粗加热器的导线。但导线加粗后趋肤效应的作用不同, 误差必然增大。同时, 强电流通过加热器将引起加热器的发热量增加, 而发热量增加过多会使热电偶的热工作状态遭到破坏, 使测量误差增加。因此, 一般在测量强电流时都采用分流器或变流器来减小流过热电式电流表的电流, 从而扩大量程。

(1) 分流法。从原理讲可分为电阻、电容和电感 3 种分流法。电阻分流法的功耗大, 故不在高频电流表中使用; 电感分流法功耗小, 易受外界交变磁场的影响, 使用的场合较少; 电容分流法用得较多。

电容分流的方法是将热电式电流表的输入端并联一只电容, 分流掉一部分高频电流, 达到扩大量程的目的。此法与普通直流电表加分流电阻相似。

采用电容、电感分流器的电流表, 其压降较大。这个压降还与被测电流的频率有关, 因此对被测电路有一定的影响。

(2) 变流法。变流法是采用变流器进行分流的方法, 如图 5-9 所示。

图中 L_1 、 L_2 组成一个高频变压器, 被测电流 I_1 从端点 F、H 的线圈 L_1 中流过, L_1 和 L_2 线圈中感应出电流 I_2 。适当选配 L_1 、 L_2 的匝数比, 如令 L_1 、 L_2 的匝数比小于 1, 就可以使 I_2 的值小于 I_1 的值, 从而实现了量程的扩大。

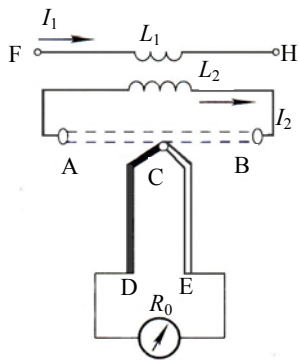


图 5-9 变流法扩大量程

5.4 电压的测量

电压、电流和功率是表征电信号能量大小的基本参数，其中又以电压最为常用。通过电压测量，利用基本公式可以推导出其他的参数；此外，电路中电流的状态，如饱和、截止、谐振等均可用电压形式来描述；许多电参数，如频率特性、增益及失真度等也可视为电压的派生量；许多电子测量仪器，如信号发生器、阻抗电桥及失真度仪等都用电压量作为指示。因此，电压测量是其他许多电参数，也包括非电参数测量的基础，是相当重要的一种参数测量。

进行电压测量时，必须先了解被测电压的特征和测试要求，选用适当的电压测量仪器，采用切实可行的测量方法，才能较好地完成测量任务。

5.4.1 模拟式电压表

1. 简单模拟直流电压表

直流电压的测量可用模拟式万用表的直流电压挡进行测量。

(1) 单量程电压表

用单独的一个磁电式表头就可测量小于 $U_g(U_g=I_g \times R_g)$ 的直流电压，若要测量较大的电压，可利用串联电阻分压原理，即在表头上串联一个适当阻值的电阻，如图 5-10 所示。

图中 R_V 为分压电阻，其阻值大小为：

$$R_V = (U - I_g \cdot R_g) / I_g$$

式中， R_V ——串接的分压电阻；

I_g ——磁电式表头流过的电流；

R_g ——磁电式表头的内阻。

(2) 多量程电压表

采用多个分压电阻与表头串联，就可制成多量程的直流电压表。如图 5-11 所示为四量程的直流电压表。

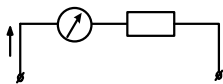


图 5-10 单量程直流电压表原理图

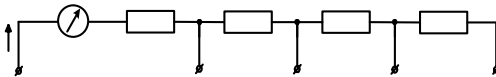


图 5-11 多量程直流电压表原理图

分压电阻分别用下列公式计算。式中： U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 为各量程的满量程电压。

$$R_{V1} = \frac{U_1 - I_g R_g}{I_g}$$

$$R_{V2} = \frac{U_2 - U_1}{I_g}$$

$$R_{V3} = \frac{U_3 - U_2}{I_g}$$

$$R_{V4} = \frac{U_4 - U_3}{I_g}$$

2. 简单模拟交流电压表

交流电压的测量可用模拟式万用表的交流电压挡进行测量。

模拟式交流电压表的原理与模拟式直流电压表类似，只不过增加了整流电路。模拟式交流电压表先将交流电流变换成直流电流，然后采用串联电阻的方法构成多量程电压表。但模拟式交流电压表有一些特点，使用时应注意。

(1) 由于交流电压灵敏度低于直流电压灵敏度，所以测量交流电压的误差大于测量直流电压的误差。

(2) 表盘上表针的偏转角度近似于交流电压的半波（或全波）整流电压的平均值，但表盘上的刻度是按正弦有效值刻度的。

(3) 由于磁电式表头的结构特点，模拟万用表测量交流电压的频率范围为 45Hz~100Hz。

(4) 由于整流二极管在低电压时的非线性，一般在交流电压低量程挡 R'_g 也是非线性的，因而刻度也是非均匀的，故交流电压 10V 挡单独刻度。

5.4.2 电压测量的应用

在测量电压时，由于被测对象不同，它们的波形、频率、幅度和等效内阻通常也不相同，对不同特点的电压应采用不同的测量方法。

1. 直流电压的测量

电子电路中的直流电压一般可分为两个大类：一类为直流电源电压，它具有一定的直流电动势 E 和等效内阻 R ；另一类是直流电路中某元器件两端之间的电压差或各点对地的电位。

直流电压的测量一般可采用直接测量法和间接测量法两种。用直接测量法测量时，将电压表直接并联在被测支路的两端。如果电压表的内阻为无限大，则电压表的示值就是被测支路两点间的电压值；间接测量法则是先分别测量两端点的对地电位，然后求出两点的电位差，差值即要测量的电压值。

直流电压的测量方法很多，常用的有以下几种：

(1) 用数字式万用表测量直流电压

数字式万用表的基本构成部件是数字直流电压表。因此，数字万用表均有直流电压挡。用数字万用表测量直流电压，可直接显示被测直流电压挡的输入电阻较高，可达 $10\text{M}\Omega$ 以上，如 DT-9901C 型数字万用表的直流电压挡的输入电阻值为 $20\text{M}\Omega$ ，将它并接在被测支路两端对被测电路影响较小。

用数字万用表测量直流电压时，要选择合适的量程，当超出量程时会有溢出显示。如 DT-9902C 型数字万用表，当测量值超出量程时会显示“OL”，并在左侧显示“OVER”表示溢出。

(2) 用模拟式万用表测量直流电压

模拟式万用表的直流电压挡由表头串联分压电阻组成，其输入电阻一般不太大，而且各量程挡的内阻不同，同一块表，量程越大，内阻也就越大。在用模拟式万用表测量直流电压时，一定要注意表的内阻对被测电路的影响，否则将可能产生较大的测量误差。如用 MF500-B 型万用表测量如图 5-12 所示电路的等效电动势 E ，MF500-B 型万用表的直流电压灵敏度 $S_V=20\text{k}\Omega/\text{V}$ ，选用 10V 量程挡，测量值为 7.2V ，理论值为 9V ，相对误差为 20% 。这是由所用万用表直流电压挡的内阻 R_V 与被测电路等效内阻相比不够大所引起的，是测量方法不当引起的误差。因此模拟式万用表的直流电压挡测量电压只适用于测电路的等效内阻很小或信号源内阻很小的情况。

(3) 用零示法测量直流电压

为了减小由于模拟式万用表内阻不够大而引起的测量误差，可用如图 5-13 所示的零示法。图中 E_s 为大小可调的标准直流电源，测量时，先将标准电源 E_s 输出置最小，电压表置较大量程挡，按图 5-13 所示的极性接入电路。然后缓慢调节标准电源 E_s 的大小，并逐步减小电压表的量程挡，直到电压表在最小量程挡指示为零，此时 $E=E_s$ 。电压表没有电流流过，电压表的内阻对被测电路无影响。然后断开电路，用电压表测量标准电源 E_s 的大小，测量值即为被测电动势 E 的大小。由于标准直流电源的内阻很小，一般小于 1Ω ，而电压表的内阻一般在千欧级以上，所以用零示法测量标准电源的输出电压，电压表内阻引起的误差可忽略不计。

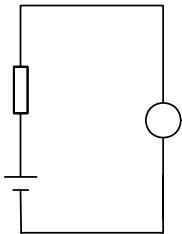


图 5-12 万用表测量等效电动势

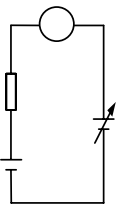


图 5-13 零示法测量直流电压

(4) 用电子电压表测量直流电压

一般在放大—检波式的电子电压表中，为了提高电压表的内阻，都采用跟随器和放大器等电路提高电压表的输入阻抗和测量灵敏度。这种电子电压表可在电子电路中测量高电阻电路的电压值。

(5) 用示波器测量直流电压

用示波器测量电压时，首先应将示波器的垂直偏转灵敏度微调旋钮旋置校准挡，否则电压读数不准确。

(6) 微安法测量直流电压

在上面介绍的直流电压测量中都存在一个分辨力问题，数字万用表的分辨力是末位数字代表的电压值，模拟电压表的分辨力为最小刻度间隔所代表的电压值的一半，量程越大，分辨力就越低。如 MF500-B 型万用表在 2.5V 量程挡，分辨力为 0.025V；在 10V 量程挡，分辨力就为 0.1V。电压表不可能测量出比分辨力小的电压。

为了准确测量大电压中的微小变化量，可能用微差法来测量。微差法和零示法都是减小系统误差的典型方法。零示法对可调电压源要求较高，因为它必须有被测电压所有可能出现的值。微差法降低了对可调标准电源的要求，测量电路与零示法相同。测量时，调节 E_s 的大小，使电压表在小量程挡（分辨力最高）上有一个微小的读数 ΔU ，则 $U_0 = U_s + \Delta U$ ，当 $\Delta U < U_0$ 时，电压表的测量误差对 U_0 的影响极小，且电压表中流过的电流很小，对被测电压 U_0 不会产生大的影响。

(7) 含交流成分的直流电压的测量

由于磁电式表头的偏转系统对电流有平均作用，不能反映纯交流量。所以，对于含交流成分的直流电压的测量一般采用模拟式电压表的直流挡测量。

如果叠加在直流电压上的交流成分具有周期性，可直接用模拟式电压表测量其直流电压的大小。

由交流信号转换而得到的直流，如整流滤波后得到的直流平均值，以及非简谐波的平均直流分量都可用模拟式电压表测量。

一般不能用数字式万用表测量含有交流成分的直流电压，因为数字式直流电压表要求被测直流电压稳定，才能显示数字，否则数字将不停地跳变。

2. 交流电压的测量

交流电压的测量一般可分为两大类：一类是具有一定内阻的交流信号源，另一类是电路中任意一点对地的交流电压。

交流电压的常用测量方法有电压表法和示波器法，具体介绍如下：

(1) 交流电压表法

交流电压表分为模拟式与数字式两大类。不论是模拟式还是数字式交流电压表，测量交流电压时都是先将交流电压经过检波器转换成直流电压后再进行测量。

模拟式万用表测量交流电压的频率范围较小,一般只能测量频率在 1kHz 以下的交流电压。但由于模拟式万用表的公共端与外壳绝缘胶木无关,即与被测电路无共同机壳接地。因此,可以用它直接测量两点之间的交流电压。

(2) 示波器测量法

用示波器法测量交流电压与电压表法相比具有如下优点:

- ① 速度快。由于被测电压的波形可以立即显示在屏幕上,避免了表头的惰性。
- ② 能测量各种波形的电压。电压表一般只能测量失真很小的正弦电压,而示波器不但能测量失真很大的正弦电压,还能测量脉冲电压及已调幅电压等。
- ③ 能测量瞬时电压。电压表由于惰性只能测出周期信号的有效值电压(或峰值电压),而不能反应被测信号幅度的快速变化。示波器是一种实时测量仪器,它惰性小,不但能测量周期性信号的峰值电压,还能观测信号幅度的变化情况,甚至可以观测单次出现的信号电压。此外,它还能测量被测信号的瞬时电压和波形上任意两点间的电压差。
- ④ 能同时测量直流电压和交流电压。在一次测量过程中,电压表一般不能同时测量出被测电压的直流分量和交流分量,但示波器能方便地实现这一点。用示波器测量电压的主要缺点是误差较大,一般为 5%~10%,现代数字电压测量技术应用于示波器,误差可减少到 1%以下。另外,用示波器测量交流电压时,读出的测量值为峰-峰值,同时有效值还需采用公式进行换算。

5.5 分贝的测量

5.5.1 数学定义

在通信、音响等系统中,常常用分贝值来表示放大器的增益、噪声电平等参数。实际测试中,通常不直接计算或测量电路中某测试点的电压或负载吸取的功率,而是计算它们与某一电压或功率基准量之比的对数。

1. 功率之比的对数——分贝 (dB)

对两个功率之比取对数,可得 $\lg \frac{P_1}{P_2}$

若 $P_1=10P_2$, 则有

$$\lg \frac{P_1}{P_2} = \lg \frac{10P_2}{P_2} = \lg 10 = 1$$

这个无量纲的数 1 叫做 1 贝尔 (Bel)。在实际应用中,贝尔单位太大,常用分贝来度

量, 写作dB (deci Bel), 1 贝尔等于 10dB。所以, 以dB表示的功率比为 $10 \lg \frac{P_1}{P_2}$ 。当 $P_1 > P_2$ 时, dB值为正; 当 $P_1 < P_2$ 时, dB值为负。

2. 电压比的对数

电压比的对数可从下列关系引出

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{U_1^2/R_1}{U_2^2/R_2} = \frac{U_1^2 R_2}{U_2^2 R_1}$$

当 $R_1 = R_2$ 时, 有

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2}$$

两边取对数, 可得

$$10 \lg \frac{P_1}{P_2} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \quad (\text{dB})$$

同样, 当电压 $U_1 > U_2$ 时, dB值为正; 当 $U_1 < U_2$ 时, dB值为负。

3. 绝对电平

如果以上公式中的 P_2 和 U_2 为基准量 P_0 和 U_0 , 则与基准量比较, 可引出绝对电平的定义。

(1) 功率电平 (dBm)

以基准量 $P_0 = 1\text{mW}$ 作为 0 功率电平 (0dBm), 则任意功率 (被测功率) P_x 的功率电平定义为

$$P_w = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} = 10 \lg \frac{P_x}{1}$$

(2) 电压电平 (dBV)

以基准量 $U_0 = 0.775\text{V}$ (正弦有效值) 作为电压电平 (0dBV), 则任意功率 (被测功率) U_x 的功率电平定义为

$$P_v = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} = 20 \lg \frac{U_x}{0.775}$$

注意, 这里定义的绝对电平都没有指明阻抗大小。所以, P_x 或 U_x 应理解为任意阻抗上吸取的功率, 或其两端的电压。很明显, 若在 600Ω 电阻上测量, 那么功率电平等于电压电平。因为在 600Ω 电阻上吸取 1mW 功率, 其两端电压刚好为 0.775V 。

4. 音量单位 (VU)

这是测量电声系统用的电平单位, 音量单位 (Volume Units, VU) 0 电平 (0VU) 定义

为在 600Ω 电阻上吸取功率 1mW 。因此, 当在 600Ω 电阻上吸取功率为 $P_x[\text{mW}]$ 时, 则

$$VU = 10 \lg \frac{P_x}{1}$$

可见, 若阻抗为 600Ω , VU 在数值上等于功率电平的 dBm 值。但是必须注意, VU 是在测量复合的声频波形时使用的单位, 故测量时必须用有效值电压表。

5.5.2 分贝值的测量

在测量放大器增益或与音响设备有关的参数时, 往往不是直接测量电压或功率, 而是测量它们与某一基准比值的对数值。一般取值的单位为分贝, 所以简称为分贝测量。

分贝测量实质上是交流电压的测量, 只是表盘以 dB 来刻度。因此其读出方法与一般的交流电压表不同。

图 5-14 所示为 MF-20 型电子式万用表度盘上的分贝刻度及两侧的附表。其测量范围为 $-70\text{dB} \sim +57\text{dB}$ 。分贝刻度的特点是, 在刻度线中间位置有一个 0dB 点, 它是以基准功率(电压)来确定的。一般规定, 在基准阻抗 $Z_0=600\Omega$ 上加交流电压, 使其产生 $P_0=1\text{mW}$ 的功率为基准, 相当于在仪表输入端加上电压 U_0 。

$$U_0 = \sqrt{P_0 Z_0} = \sqrt{1 \times 10^{-3} \times 600} \approx 0.775 \text{ (V)}$$

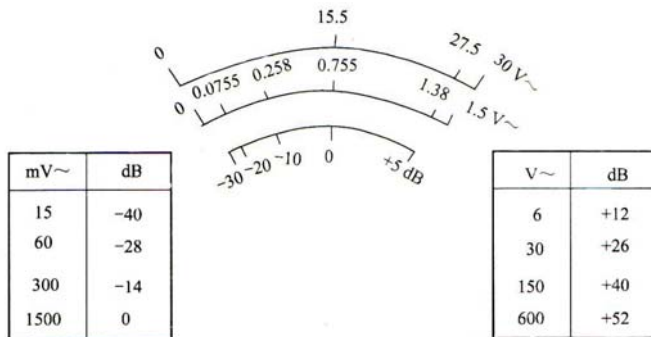


图 5-14 分贝刻度的读法

即在 1.5V 刻度线上的 0.755 处定为 0dB , 被测电压有效值 $U_x > 0.755\text{V}$ 时, 分贝数为正值; $U_x < 0.755\text{V}$ 时, 分贝数为负值。该仪表刻度为 $-30\text{dB} \sim +5\text{dB}$ 。

例如: $U_x=1.38\text{V}$ 时, 对应的分贝值是

$$20 \lg \frac{1.38}{0.775} = +5\text{dB}$$

所以, 1.5V 刻度线上的 1.38V 处与分贝刻度 $+5\text{dB}$ 对应。

5.6 功率的测量

测量从直流到几百赫兹频率信号的功率,可采用电动式功率表;而测量较高频率信号的功率,则采用其他类型的仪表,如音频功率表、频功率表等。本节叙述高频和较高频信号功率的测量方法。

5.6.1 音频与较高频信号功率的测量

通常在音频范围内,通过测量已知负载电阻两端的电压 U ,并利用关系式 $P = \frac{U^2}{R}$ 计算功率的方法来测量功率。

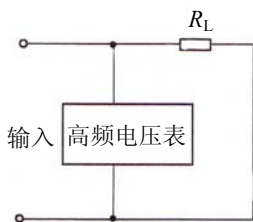


图 5-15 吸收型功率表的原理框图

在较高频率范围内,可采用吸收功率表测量功率。吸收型仪表的原理框图如图 5-15 所示。

它由一个电阻器 R_L 和一个高频电压表组成,电阻器额定频率范围内保持恒定的电阻值,而电压表是按功率单位刻度的。

这种类型的仪表通常只限于在频率低于 500MHz 的情况下使用。对于相当于微波频段的较高频率来说,需要采用其他类型的吸收型仪表。

用于 500MHz~40GHz 频带内的两种吸收型仪表是量热计和测量热电阻式功率表。

图 5-16 (a) 所示为基本的量热式功率表。被测量信号把电阻器加热,使其温度上升。该电阻器是在一个完全密封和绝缘良好的液槽内,槽壁绝缘使热量很少从槽内释放出去。如果在加入信号的前后测量槽内的温度,则其温差为电阻器所产生热量的度量。知道液体的体积、比热和液槽的特性便可以计算出功率。

以上方法由于需要知道量热计液槽材料的准确质量和比热,且与周围完全隔热非常困难,为此可采用替代式功率表,如图 5-16 (b) 所示。将被测信号加到槽内终端电阻 R_1 上,并记录槽内的平衡温度;然后除掉信号,并加入直流或低频交流信号给 R_2 供电,直到达到相同的平衡温度为止。功率可采用电压表准确测量。

另一种测热式仪表是比较流动式测热计。如图 5-16 (c) 所示,连接有温度计的输入负载和连接有测量计的比较负载组成交流电桥的两个臂,其余的电桥臂实际上是具有中心抽头的变压器 (T) 的两侧绕组。当电桥由于两负载之间的温度差而不平衡时,在放大器的输入和接地点之间有输出电压,该电压放大后反馈到比较负载上,并用仪表监控它。当达到平衡时,比较负载中的功率必定与输入负载中的功率相等,因而按功率单位刻度的仪表可读出输入功率。

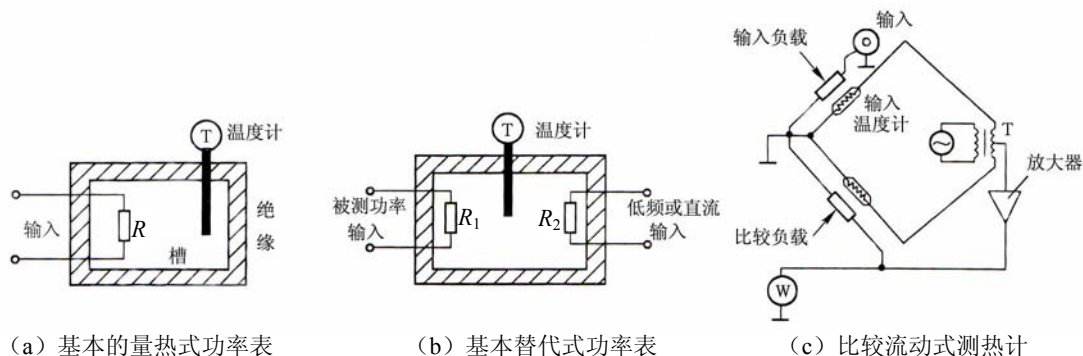


图 5-16 测热式功率表原理图

最常用的一种吸收型仪表是测热计电桥。如图 5-17 (a) 所示, 其中一个电桥臂接有热敏电阻器 θ , 将 θ 放在被测功率的信号场内, 功率被电阻所吸收所产生的热量引起电阻变化。电阻的这种变化用电桥电路来测量。

典型的测热式热敏电阻功率表如图 5-17 (b) 所示, 它采用两个匹配的热敏电阻, 一个与高频负载 R_1 耦合, 另一个同测量仪器内部的直流负载 R_2 耦合。两个热敏电阻都接在电桥中, 并且用一个高增益直流放大器 A 作为零值检测器。当高频功率源加到调频负载 R_1 上时, 热敏电阻 θ_1 被加热, 使电桥失去平衡。放大器有一输出信号使直流负载 R_2 加热, 所以这时的直流功率与调频功率相等。然后就可校准连接在放大器输出电路上的表头, 直接给出高频功率的读数。

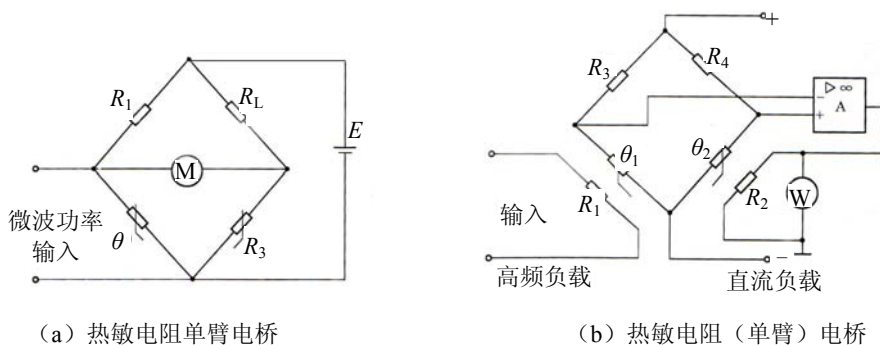


图 5-17 测热式热敏电阻功率表

热敏电阻功率表一般用于从直流到微波的频率范围, 量程从 $1\text{mW} \sim 1\text{W}$, 其准确度主要取决于热敏电阻与负载装置的匹配程度和负载本身的高频特性。

另一种是热电偶功率表, 它将热电偶与一个吸收高频输入信号功率的电阻性元件相接触, 使热电偶加热。由热电效应产生的电流可直接使动圈式表头偏转。整个装置密封在真

空的玻璃容器中, 这样就可使热电偶的温升尽可能地快, 从而提供较高的灵敏度。

可供选择的两种设计方案如图 5-18 所示。在图 5-18 (a) 中采用一个连接在电阻负载滑动端上的热电偶装置, 它广泛用于 $5\text{W}\sim 50\text{W}$ 量程、频率范围从直流到 500MHz 的功率表中。图 5-18 (b) 采用一个由串联电阻加热热电偶, 这种方法的频率范围可从直流到 1GHz , 功率量程为 $1\text{W}\sim 100\text{W}$ 。

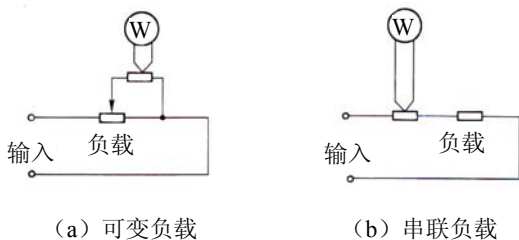


图 5-18 热电偶功率表

简单的热电偶功率表虽能满足量程要求, 但其灵敏度不高。在一块小基片上形成若干串联的热电偶, 这样做成的薄膜器件可以明显地提高将输入功率转换为输出电压的变换效率。当配用合适的直流放大器时, 这种热电偶装置可测低至 $1\mu\text{W}$ 的功率。采用薄膜技术, 串联电阻与热电偶组合件的温度时间常数可减小到一瞬间, 器件也就无需真空封装。

上述功率表对功率变化的响应较慢, 而二极管功率表的准确度通常低于以热电效应为基础的仪表, 但它具有响应较快的特性。

二极管吸收型功率表如图 5-19 (a) 所示, 它可有效地监视高频负载两端的电压。反射式功率表如图 5-19 (b) 所示, 它可借助于定向耦合系统监视入射功率与反射功率。在这两种情况下, 校准工作都可施加已知的高频功率来完成。低功率输入时, 二极管工作在特性曲线的平方律部分, 这样可以相当精确地测量实际 (平均) 功率; 但在较高输入功率时 (超过 1mW), 由于二极管工作区域移到特性曲线的近似线性部分, 因此只有在测试正弦波信号时才能得到精确的结果。

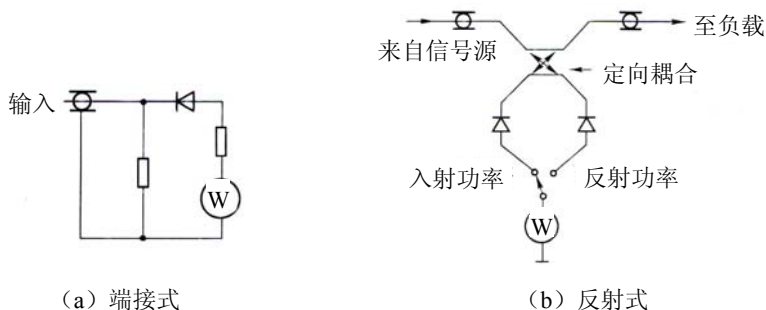


图 5-19 二极管吸收型功率表

由于在失配时总会发生功率反射,故反射式功率表可作为检查天线和调频功率放大器调谐及匹配的有效仪器。

5.6.2 误差分析

误差来源包括仪器、信号源与负载的失配及信号波形对某些功率表的影响误差。

功率表由生产厂家在严格控制的条件下校准,并以相对于满刻度偏转的百分比误差来表示。在低于满刻度读数时,准确度随输入功率的减小而逐渐下降。因此,一些厂家将准确度指标分为两部分:读数的百分比和满刻度的百分比。在满刻度偏转时,由两种方法提供的准确度一般是相等的,但在较低读数时用第二种方法给定的仪器准确度更好些。

功率测量的满刻度偏转误差是敏感探头和显示部分所形成的误差的总和。敏感器的准确度取决于它把输入功率转换成直流或低频输出信号所产生的误差。而显示部分则依据将输入直流或低频信号转换为读数时的误差。

功率测量系统中频率响应形成的误差,可作为总指标的一部分,也可作为单独部分在校正图表中给出。

许多功率表具有温度敏感性,如果仪器不在校准温度下(一般为 20°C)工作,其准确度就会下降。

失配误差取决于信号源与负载的匹配情况。

用真正热效应功率表测出的读数通常是正确的,与所加信号的波形无关。而二极管功率表用于高功率测量,对于非正弦波情况将会有较大误差。

5.6.3 功率表实例——射频功率表

图 5-20 所示为一射频功率表电路,可以测 $1\text{W}\sim 14\text{W}$ 的功率。电路的输入端接射频功率源,输出端接电阻性假负载。输入端到输出端的射频电流流过 L_2 ,在 L_1 上产生感应电压,经 VD_1 和 VD_2 整流后,通过 R_1 、 R_{P2} 及 R_{P3} 送到功率表上。 C_1 和 C_2 用来调整电路的平衡。使用时,先置 S_1 于“1”位(前位),调 R_{P2} ,使功率表满量程;然后置 S_1 于“2”位(标准位),此时,功率表的指示与满量程的差值就是输出功率。 R_{P3} 和 S_2 用来扩展功率表的量程。

使用功率表前,先要校准。方法如下:连接好射频功率源和假负载, R_{P2} 置于最上端,根据功率表的读数来确认 S_1 的位置(功率表读数最大的位置是“1”位,另一位置是“2”位)。然后置 S_1 于“2”位,调整 C_1 ,使功率表指到满量程。交换功率源和假负载的位置(假负载位于输入端,功率源位于输出端),置 S_1 于“1”位,调整 C_2 ,使功率表指到满量程。反复以上过程若干次,电路校准就完成了。

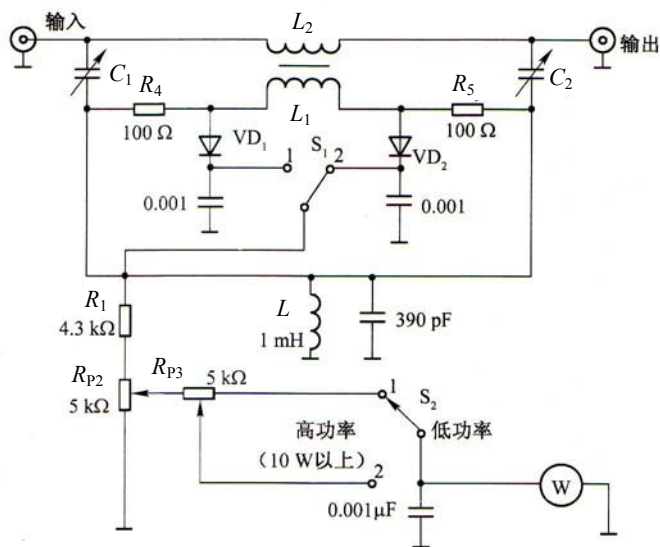


图 5-20 射频频功率表

本电路对频率变化不敏感,在很宽的频率范围内刻度都是准确的。为了得到最佳效果, R_1 、 R_{P2} 和 C_1 、 C_2 应当匹配。通常 R_1 、 R_{P2} 必须小于 L_2 的阻抗,以避免对 L_2 上电流有任何明显影响。

C_1 、 C_2 为 $3\text{pF} \sim 20\text{pF}$ 范围内的可调电容, VD_1 及 VD_2 可用 1N34A (2AP18-2)、1N60 (2AP18-1) 或相同性能的二极管。 L_1 用 28 号线绕 46 圈, L_2 用 22 号线在 L_1 的外层绕两圈。 L 为 1mH 的射频扼流圈。

*5.7 噪声电压的测量

5.7.1 噪声的基本特性

在电子电路中,噪声主要是由各种元器件(例如晶体管、电阻等)内部带电质点运动的不规则所造成的现象。它严重地影响系统传输微弱信号的能力。对于一个放大器而言,当输入信号为 0 时,由输出端含有的杂散交流电压即噪声电压。

导体、半导体及杂质材料在一定温度下,由于内部微粒不规则的热运动产生的噪声,称为**热噪声**。它与保持电路及环境的热平衡所需要的能量进行热交换有关。还有一种噪声是在电路通过晶体管 PN 结时,由于电荷运动的不连续而产生的晶体管噪声,称为**散粒噪**

声。上述两种噪声在线性频率范围内其能量分布是均匀的。在光谱学里,把各频率能量分布均匀的光称为白光,称这类噪声为**白噪声**。这类噪声是我们所要测量的对象。

由上述可知,噪声是一种随机信号,其波形是非周期性的,其变化是无规律的。可以用统计滴水穿石的方法把它当作随机过程来处理。

5.7.2 器件和放大器噪声的测量

一般噪声测量采用两种方法,即正弦信号法和噪声发生器法。两者各有一定的应用范围和一定的限制,选择哪一种方法取决于频率范围和选用的仪表。

不论采用哪一种测量方法,被测放大器的输出端噪声都必须足够大。当被测放大器的输出噪声较小时,应在它和测量仪表之间加线性放大器,且该放大器的等效输入噪声应远小于被测放大器的输出噪声,带宽应大于被测放大器的带宽。

放大器“噪声量”的表示形式是放大器的等效输入噪声电压(或电流)。所谓等效输入噪声就是把放大器产生的全部噪声折算为输入端的噪声电压或噪声电流。

图 5-21 所示为等效输入噪声源的模型,可用来计算放大器的等效输入噪声。

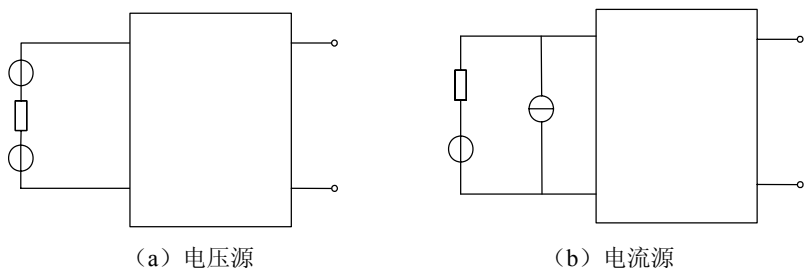


图 5-21 等效输入噪声源模型

1. 等效输入 U_{ni} 的测量

一个有噪声的器件,可以用一个理想的无噪声器件等效,即将实际的输出噪声电压 U_{no} 等效到理想器件的输入端。令理想器件的电压增益为 A_u ,则该网络和等效输入噪声可表示为:

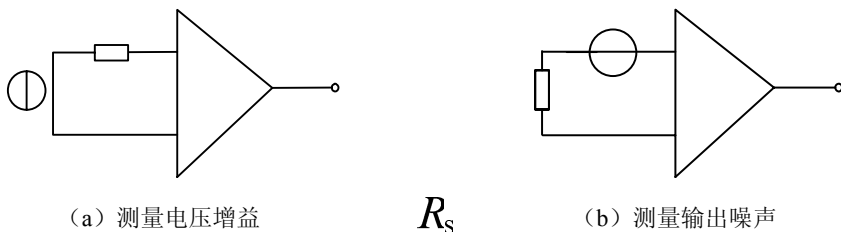
$$U_{ni} = \frac{U_{no}}{A_u}$$

式中, U_{ni} ——被测器件的等效输入噪声电压;

U_{no} ——被测器件的输出噪声电压。

(1) 用正弦信号法测量 U_{ni}

测量原理如图 5-22 所示。

图 5-22 用正弦信号法测量 U_{ni}

以正弦波为测量信号，测量放大器的电压增益 A_u ，如图 5-22(a) 所示，其定义为：

$$A_u = \frac{U_o}{U_s}$$

式中， U_o ——放大器的输出电压；

U_s ——信号源电压。

用有效值电压表分别测量 U_o 、 U_s ；短路放大器输入端，保留源电阻 R_s ，测总的输出噪声 U_{no} ；用输出噪声 U_{no} 除以电压增益，求得 U_{ni} ，如图 5-22 (b) 所示。

利用正弦法要注意：必须在比噪声高的信号电平上测量 A_u ；必须在等于源阻抗的发生器阻抗下测量 A_u 。测量 U_{no} 时，应符合带宽准则。

(2) 用噪声发生器法测量 U_{ni}

用一台输出电平校准好的噪声发生器接到被测放大器的输入端，其内阻 R_s 应等于放大器实际工作时的信号源电阻，如图 5-23 所示。

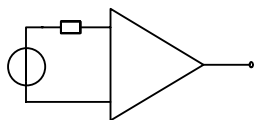


图 5-23 用噪声发生器法测量 U_{ni} 设噪声发生器输出噪声电压为 U_{ns} ，用有效值电压表测得放大器输出总噪声电压的有效值为 U_{no2} ；然后，去掉噪声发生器，即被测放大器的输入端接 R_s 时，测得输出端电压有效值为 U_{no1} 。由 U_{no2} ， U_{no1} 可求得 U_{ni} 。

$$U_{ni} = \frac{U_{no1}^2}{U_{no2}^2 - U_{no1}^2} U_{ns}$$

当 $U_{no2} = \sqrt{2}U_{no1}$ 时， $U_{ni} = U_{ns}$ 。

为计算方便，需要调节放大器输出噪声电压两次读数的比值为 $\sqrt{2}$ 时，记下这时噪声发生器的输出电压 U_{ns} ，即为等效输入噪声电压 U_{ni} 。

(3) 两种测量方法的比较

正弦波法的优点是用于测量低频噪声，并可利用通用的测量设备。但这种方法需要测量被测系统的增益、总输出噪声及噪声带宽，而这些量的精确测定比较困难，测量步骤比较麻烦。

噪声发生器比较简单,测量准确度比较高,但低频噪声的测量需要较昂贵的标准噪声带源。一般情况下,正弦信号法较适用于对低频和中频噪声的测量,高频噪声测量多采用噪声发生器法。

(4) 测量噪声时需要考虑的问题

① 带宽的影响

由于噪声功率正比于系统的等效噪声带宽,即噪声电压的有效值正比于系统等效噪声带宽的平方根,因此测量噪声电压时所选用的电压表,其带宽应该远大于被测系统的噪声带宽;否则将使示值偏低。在这种情况下,可用下式修正:

$$\frac{U'_n}{U_n} = \sqrt{\frac{B'_{wn}}{B_{wn}}}$$

式中, U_n ——修正后的噪声电压,即带宽可无限扩展的理想电压表测得的噪声电压;

U'_n ——有限带宽的电压表所测得的噪声电压;

B_{wn} ——被测系统的噪声带宽;

B'_{wn} ——被测系统与电压表组成的总噪声带宽。

因为 $B'_{wn} < B_{wn}$, 故 $U'_n > U_n$, 结果将产生测量误差,其相对误差为:

$$\gamma = \frac{U'_n - U_n}{U_n} = \sqrt{\frac{B'_{wn}}{B_{wn}}} - 1$$

由计算可得,为使测量误差小于5%,要求电压表3dB带宽为被测系统噪声带宽的8~10倍,这就是**带宽准则**。

② 平均值和波形系数

噪声电压的测量除用有效值电压表外,也可以采用其他响应的电压表,这时,如将示值视为有效值,将产生波形误差。例如,采用平均值响应的电压表测的噪声电压示值为 U_α , 由计算得出噪声电压的有效值 U_n 为:

$$U_n = 1.13 U_\alpha$$

可见,将平均值电压表的示值乘以1.13就是噪声电压的有效值。式中的1.13是白噪声电压的波形系数,由 $K_F=1.25$ 乘以0.9得出。

③ 测量时间的影响

噪声测量,实质上是求平均值的过程。从理论上讲,求平均值应在无限长时间内进行,在有限平均时间内测量噪声会产生误差,这种误差是一个随机变量,它使电压表的指针产生抖动。为了精确测量噪声必须增加求平均值的时间表,以便平滑指针的抖动。

对同样的测量准确度,窄带测量所要求的平均时间比宽带测量要求的平均时间要长。例如,分别测量噪声带宽为5Hz和1kHz的两个系统的噪声,为使误差小于等于1%,所需的测量时间分别为1000s和5s。可见,要使低频测量达到高精度是较困难的,而且很花时间。因此,测量低频噪声通常采用记录仪或存储示波器,把噪声波形记录下来,测量其峰

一峰值,然后再换算成有效值。

④ 由于白噪声呈高斯正态分布。为避免噪声,波峰被削掉,测量过程中表头示值不得超过满刻度值的一半。

2. 噪声带宽的测量

当研究噪声时,需要知道噪声带宽 B_{wn} 。以放大器为例,噪声带宽可写成:

$$B_{wn} = \frac{1}{A_{um}^2} \int_0^{\infty} A_u^2(f) df$$

式中, $A_u(f)$ ——电压增益随频率变化的函数;

A_{um} ——中频增益。

噪声带宽 B_{wn} 也有正弦信号法和噪声发生器法两种测量方法。

(1) 正弦信号法

利用正弦信号法测量噪声带宽,实质上是测量被测放大器的幅频特性曲线,然后求

$A_u^2(f)$ 曲线下的总面积 S , 于是 $B_{wn} = \frac{S}{A_{um}^2}$ 。

一个最简单的求总面积的方法是,将 $A_u^2(f)$ 曲线下的面积分成若干窄条,如图 5-24 所示,每一窄条的面积 S_i 可看成由一个矩形和一个三角形组成,求面积总和可得

$$B_{wn} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{A_{um}^2}$$

测量方法如图 5-25 所示,将交流电压表分别跨接在待测系统的输出端和输入端上,系统对其施加适当的偏置电压,维持系统输入电压不变时,测出不同频率下的输出电压,直至得到足够多的数据,精确绘制出电压增益平方随频率变化的曲线图。

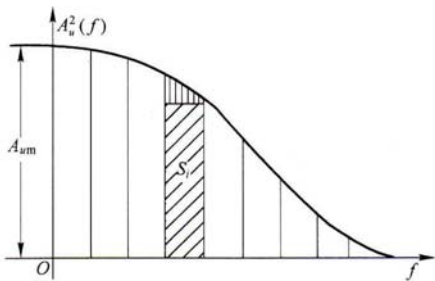


图 5-24 B_{wn} 的计算方法



图 5-25 用信号发生器测噪声带宽

(2) 噪声发生器法

将噪声放大器接到被测电路的输入端,应使输入噪声大到主要由这个噪声源产生,测

量总的输出噪声电压 U_{no} ，则

$$B_{wn} = \frac{U_{no}^2}{A_u^2 S_i(f)}$$

式中， A_u ——电压的增益；

$S_i(f)$ ——噪声发生器加到被测电路输入端的白噪声频谱密度。

3. 信噪比的测试

信号功率 P_s 与 P_n 之比称为信噪比（SNR），可表示为：

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}$$

如果 P_s 、 P_n 是在单位电阻上耗散的功率，则有

$$SNR = \left(\frac{U_s}{U_n} \right)^2$$

以分贝表示的信噪声比为：

$$SNR[dB] = 10 \lg \frac{P_s}{P_n}$$

信噪比测量的原理如图 5-26 所示。首先调节信号发生器到所需要的电压值，开关S置于“1”位，用窄带电压表测量测试点处的信号电压 U_n 、由 U_s 和 U_n 的值求信噪比。

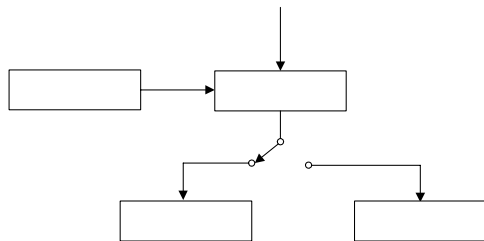


图 5-26 信噪比测量原理

4. 噪声系数的测量

在电子电路中，噪声与信号是相对存在的。在工程技术中，常用噪声系数表示电路噪声的大小及放大器的噪声性能。

$$\text{噪声系数 } F = \frac{\text{输入信噪比}}{\text{输出信噪比}} = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} = \frac{P_{no}}{P_{ni} A_p}$$

式中， $A_p = \frac{P_{so}}{P_{si}}$ ——放大器的功率增益。

噪声系数是无量纲的量，常用分贝来表示，即：

$$F_{dB} = 10 \lg F$$

噪声系数表征器件或者放大器引起的信噪声比降低的程度。一个不产生噪声的理想放大器，总输出噪声功率等于输入噪声功率乘以放大器的功率增益，即 $P_{no} = A_p P_{ni}$ 。此时 $F=1$ 或 $F_{dB}=0dB$ 。如果放大器的输出噪声功率点比理想情况大一倍，则 $F=2$ 或 $F_{dB}=3dB$ 。放大器

本身产生的噪声越大, F 就越大。利用噪声系数可以确定放大器的极限灵敏度或最小可检测电压。

(1) 利用噪声发生器测量噪声系数

如图 5-27 所示, 噪声发生器能产生一种均匀频谱的白噪声。噪声源是一只工作在饱和状态的二极管, I_s 为二极管饱和电流。

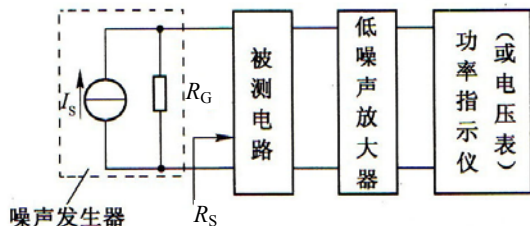


图 5-27 用噪声发生器法测噪声系数

噪声发生器表头按 I_s 大小直接用噪声系数标度。测量噪声系数时, 将噪声发生器作为被测网络的信号源。同时, 噪声发生器的输出电阻应等于被测网络所要求的信号源内阻 (不等时需接附加电阻)。被测网络的输出端接有低噪声放大器以提高增益, 保证功率指示仪正常工作。功率指示仪用来测量噪声功率。测量时, 先求得无信号时, 即 $I_s=0$ 时的输出功率 P_0 , 然后将信号输出, 调整 I_s 使输出功率为 $2P_0$, 此时, 从噪声发生器表头上可读出噪声系数。由于测量时采用了两倍功率增益的方法, 又称为功率倍增法, 这种方法适于测量器件或放大电路工作在高频时的噪声系数, 测试简单而准确, 但需要有经过校准的宽带噪声放大器, 若实验室无此设备, 可改用正弦信号法。

若采用电子电压表代替功率指示仪, 两次电压表示值之比应为 $\sqrt{2}$ 。由于测量的是放大器输出噪声的比值, 电压表可为有效值响应的或平均值响应的。测量误差主要取决于噪声发生器刻度的准确度, 其次是功率指示仪的准确度。

(2) 正弦信号法

正弦信号法的测量原理同噪声发生器法一样, 只是信号源采用正弦恒压源, 采用这种方法测量比较复杂, 且误差较大, 只适用于低频或缺乏专用噪声发生器的场合。

※5.8 失真度的测量

在线性电路中, 由于电路工作点选择不当或信号幅度超过了电路的线性范围, 使信号进入非线性区而产生非线性失真。非线性失真的主要特点是在输入信号中产生了新的频率

分量。

5.8.1 非线性失真的定义

信号的非线性失真通常用非线性失真系数来表示（简称失真度）。其定义为全部谐波分量的功率与基波功率之比的平方根值。如果负载与信号频率无关（例如纯电阻负载），则信号的失真度又可定义为：全部谐波电压的有效值与基波电压的有效值之比，用 γ 表示。

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}}{U_1} \times 100\%$$

式中， U_1 ——基波分量的有效值；

U_2, U_3 ——分别为各次谐波分量的有效值；

U_n ——多次谐波分量的总有效值（不含基波）。理论上 $n \rightarrow \infty$ ，但一般高次谐波分量较小。实际上只要取到三次或五次谐波就足够了。

由经验得知，对于音乐信号，人耳可以觉察出 0.7% 左右的失真度；对于话音信号，人耳可以觉察出 3%~5% 的失真度（这时用示波器也可以看出）。目前，失真度的测量范围下限已达到 0.01%。

在实际工作中，被测信号的基波分量的有效值难于测量，而测量被测信号总的电压有效值比较容易，所以常用的失真度测量仪给出的失真度为：

$$\gamma' = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}} \times 100\%$$

式中，分母为被测信号总的有效值。

可以证明， γ 与 γ' 的关系为

$$\gamma = \frac{\gamma'}{\sqrt{1 - (\gamma')^2}}$$

在测量了 γ' 后，可用上式计算 γ 的值。

5.8.2 失真度测量仪举例

KH4116 型低失真度测量仪是一台数字化的仪器，被测信号的电压、失真度及频率全部由 LED 自动显示，采用真有效值检波，可在电压测量范围为 300 μ V~300V、频率范围为 10Hz~550kHz 之内实现全自动测量，失真度测量范围为 0.01%~100%。

在失真度测量方式中实现了宽范围校准。失真度量值既可以随滤除谐波（滤谐）过程自动跟踪显示，也可以用手动衰减器按 10dB 步时跟踪。为了提高测量精度，可以随时用相位调节和平衡调节来完成，设置了自动清零功能，目的是为了使用户在测量低失真、超

低失真时, 自动对信噪比进行均方根运算, 减小人工计算的麻烦。该仪器同时具有平衡输入电压和失真度测量的功能, 其工作频率范围较宽。

1. 基本工作特性

(1) 失真度测量

- ① 频率范围: 10Hz~110kHz (不平衡)

10Hz~40kHz (平衡)

- ② 失真度测量范围: 0.01%~100%

- ③ 准确度: 20Hz~20kHz

±0.5dB (满度值)

10Hz~110kHz

±1dB (满度值)

失真度在 0.03% 以下时

±2dB

- ④ 残余失真和噪声 (在输入信号 ≥ 900mV 的状态下, 滤谐后)

- 输入短路, 不清零时: ≤ 0.008%

- 输入短路, 清零时: ≤ 0.004%

- ⑤ 输入信号电压范围: 300mV~300V

(2) 电压测量

- ① 电压测量范围: 3mV~300V (满度值), 最小可测到 300μV

- ② 频率范围: 10Hz~550kHz (不平衡)

10Hz~120kHz (平衡)

- ③ 以 1kHz 为基准的频响

不平衡: 20Hz~100kHz

±1dB

10Hz~550kHz

±1.5dB

平衡: 10Hz~120kHz

±1.5dB

- ④ 电压表准确度: (以 1kHz 为基准) ±5% (满度值), 固有噪声 ≤ 50μV

- ⑤ 电压表有效值波形误差: ≤ 3% (输入信号波峰因数 ≤ 3 时)

(3) 频率测量

- ① 频率测量范围: 10Hz~550kHz; 准确度: 0.1% ± 2Hz

- ② 输入信号 ≥ 5mV

2. 基本工作原理

该仪器的工作原理采用基波滤除的方法, 如图 5-28 所示。

设计中对关键电路和器件采用了特殊的设计和制造工艺, 并结合了当代计算机技术、程控自动跟踪和 LED 数字显示。增设了频率计数功能, 可使被测信号的频率直接由 LED 精确显示出来。仪器面板上保留了示波器输出监视插孔, 便于使用者直接观察到被测信号的波形。特别是在失真测量状态下, 使用者可直接观察到被测信号的失真主要是由哪

次谐波形成的，并且能观察滤谐状态。在小失真信号测量时，可以直接观察到整机的滤谐状态。

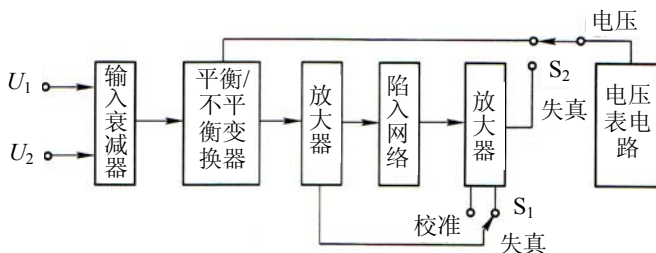


图 5-28 失真度测量仪的原理方框图

对平衡信号的测量，在设计时采用了特种平衡—不平衡转换电路，扩展了使用频带。在设计中仍保留了相位和平衡及校准的手动调节，主要是出于：①手动调节可对滤谐网络进行精确调谐，可消除自动调谐带来的固有误差，提高小失真的测量精度。②降低了仪器成本。该仪器的陷波网络滤除特性可达 90dB~100dB，还设计了 600kHz 的低能滤波器，从而保证了在使用整机中避免外来干扰的进入。同时又设计了 400Hz 高通滤波器，当测量高于 400Hz 的信号失真时，按下它可以消除 50Hz 的电源干扰。

该仪器采用了高精度的真有效值检波器，使信号的波峰因数在不大于 3 的情况下不会带来像采用平均值或准有效值检波器那样的检波误差。

该仪器关于失真度的测量原理如下。

按照惯例，仪器指示的失真度为：

$$\gamma' = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}} \times 100\%$$

即被测信号中各次谐波的总有效值与被测信号的总有效值的百分比，基中 U_1 为基波分量。

但按失真度的定义：

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}}{U_1} \times 100\%$$

即被测信号的总谐波的有效值与其基波有效值之比的百分数。

当失真度小于 10% 时， $\gamma' \approx \gamma$ ；当失真度大于 10% 时，应按下式加以计算修正：

$$\gamma = \frac{\gamma'}{\sqrt{1 - (\gamma')^2}}$$

式中， γ' ——该仪器的显示值；

γ ——修正后的真实的失真度量值。

在测量 0.1% 以下的低失真信号时, 可以使用机内的清零功能对信噪比进行均方根运算, 如不使用清零功能也可用下式人工计算测量结果:

$$\gamma = \sqrt{(\gamma')^2 - (\gamma'')^2}$$

式中, γ ——经修正后的失真度量值;

γ' ——该仪器滤除谐波后的显示值;

γ'' ——滤除谐波后, 将输入信号去掉, 然后用短路器将输入端短路, 去掉输入信号时所显示的数值。

3. 失真度测量的误差分析

(1) 由失真度的定义可知, 失真度本身就是一个误差量, 而且它还不足以表征信号失真的全部特征, 因而无需对它的测量准确度提出过高的要求。所以一般失真度测量仪器的基本误差为 $\pm(5 \sim 10)\%$, 已能满足测量要求。当然, 在失真度较小而且要求测得比较准确时, 这个误差就显得大了一些。

由前述已知, 失真仪是用实测值 γ' 代替定义值 γ 来实现失真度的测量的。这就存在一定的理论误差 γ_T , 它等于失真度的实测值 γ' 与定义值 γ 之间偏差的相对值, 即:

$$\gamma_T = \frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} = \frac{\gamma'}{\gamma} - 1 = \sqrt{1 - (\gamma')^2} - 1$$

由此可以算出, 当测量值 γ' 为 10% 时, 理论误差 $\gamma_T = -0.5\%$ 。可见当 γ' 明确后, γ_T 是一个固定值, 可以进行修正。为了减小测量误差, 当 $\gamma' > 10\%$ 时, 可用 $\gamma = \frac{\gamma'}{\sqrt{1 - (\gamma')^2}}$ 算出失真度的实际值。

(2) 失真仪中的基波抵制网络很难做到将基波分量全部滤除, 也很难做到对二次以上的谐波一点不衰减, 这也会造成一定的测量误差。在测量过程中, 还可能串入一些杂散干扰信号, 使谐波分量增大 (这时可以在信号与失真仪之间接入一个滤波器, 以抑制干扰信号), 引起测量误差。

(3) 测试仪器本身也会由于许多原因而产生误差。每种失真测量系统本身都存在固有的失真。例如, 失真测试仪中前置放大器和滤波器也会产生一定的失真。仪器的技术指标中将会给出这类失真的大小。

(4) 当测量信号失真度时, 由电压表读出的失真度应扣除仪器本身的失真度。当测量高频信号的失真时, 应知道失真仪的带宽。典型的现代失真度仪的上限频率约为 300kHz, 这意味着 100kHz 的三次谐波是有效读数, 100kHz 通常是这类仪器的基频上限。

在使用失真度仪时, 应注意正确使用外接滤波器。如果谐波频率处在激光器的阻带内, 这些滤波器显然不适用。此外, 还应正确设置输入控制电平, 如果输入控制电平过低, 则输入前置放大器自身就会产生附加失真; 如果输入控制电平过高, 则输入前置放大器就会

产生附加噪声。

(5) 当测量失真度时, 应采用有效值电压表, 若采用峰值或平均值电压表, 则会引入一定的误差, 应予以修正。

(6) 另一个误差源是陷波滤波器。仪器的技术指标通常会规定在基频和二次谐波处的衰减, 通常陷波器对基波的衰减应大于 100dB, 二次谐波的误差应小于 1dB, 而对较高次谐波应误差得更小; 如果二次谐波的误差大于 1dB 就会影响失真度测量结果的正确性。

测试过程容易出现的差错是: 漏接了地线、屏蔽不完善、测试信号电平不正确、杂散信号干扰、设备振动, 以及高频或电磁干扰等。

5.9 小 结

本章主要介绍了对模拟电流、电压、噪声、失真度和功率的测量。除了阐述它们的测量方法外, 对所用到的测量仪器和在测量过程中所产生的测量误差也做了详细的分析。

要求大家通过学习本章, 掌握上述各种参数的测量方法和测量仪器的正确使用。

5.10 思考题

1. 电流的直接测量与间接测量原理有何区别?
2. 电流表的基本量程和扩大量程, 哪一个量程的测量准确度高, 为什么?
3. 有两只量程相同的电流表, 但内阻不一样, 问哪只电流表的性能较好, 为什么?
4. 电流的测量方案有哪些?
5. 简述电压测量的意义。
6. 实验中, 利用同一块峰值电压表测量幅度相同的正弦波、方波及三角波的电压, 读数是否相同, 为什么?
7. 欲测量失真的正弦波, 若手头无有效值电压表, 则选用峰值表还是平均表更适合, 为什么?
8. 简述用平均值表测量噪声电压的工作原理。

第 6 章 数字量的测量及仪器

6.1 概 述

随着数字化技术的迅速发展和应用，电子测量的基本电参量——电压、相位、频率和时间的测量基本上都采用了数字化测量技术，这样便于与微处理器接口连接，扩展测量功能，如自检、自动校准、自动量程转换以及通过外部通信接口实现程控操作等。所采用的测量仪器分别为数字电压表、电子计数器和数字相位计。

从 20 世纪 50 年代逐步发展起来的数字式测量方法，是利用模拟/数字 (A/D) 转换器，将连续的模拟量转换成离散的数字量，然后利用十进制数字方式显示被测量的数值。在电子技术、计算机技术、半导体技术迅速发展的今天，数字式仪表的绝大部分电路都已集成化，摆脱了笨重的指针式表头，所以数字式仪表显得格外精巧、轻便，而且还具有测量准确度高、测量速度快、数字显示和功能多样等优点。因此，数字式仪表在自动化测试系统中占有重要的地位。

6.2 电压的测量

6.2.1 电压测量的基本要求

电压是表征电信号的主要参数之一，几乎是所有电子仪器及设备的主要技术指标。电子技术中常用的各种参量，如增益、衰减、功率、驻波比、失真度、噪声系数和频谱等都是直接或间接地与电压有关。因此电压是一个涉及面广、影响大的参量。它的精确测量对整个电子技术具有举足轻重的作用。电子测量对电压测量提出如下要求：

- (1) 测量量程广。
- (2) 输入阻抗高。
- (3) 能适应各种不同的波形。
- (4) 测量具有数字化、自动化和智能化。

为了实现这一目标，产生电压测量的数字化方法，即用数字电压表测量电压。

6.2.2 数字电压表的组成原理及主要性能指标

1. 数字电压表的基本组成原理

数字电压表(Digital Voltage Meter, DVM)是利用模/数转换原理,将被测电压转换为数字量,并将测量结果以数字形式显示出来的一种电压测量仪器。图 6-1 为直流数字电压表的基本框图。

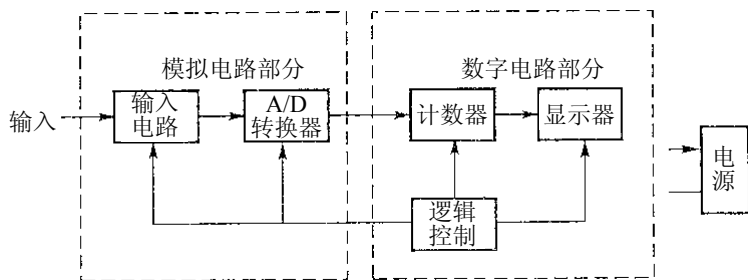


图 6-1 数字电压表的组成框图

图中输入电路(包括阻抗变换电路、放大和扩展量程电路)和模/数转换器称为模拟电路部分;计数器、显示器和逻辑控制电路称为数字电路部分。基本的直流数字电压表就由这两部分组成。

2. 数字电压表的主要性能指标

表示数字电压表工作特性的技术指标很多,最主要的有以下几项。

(1) 分辨率。分辨率是指 DVM 能够显示的被测电压的最小变化值,即显示器末位跳动一个数字所需的电压值。在不同的量程上 DVM 的分辨率是不同的。显然,在最小量程上, DVM 具有最高的分辨率。

(2) 测量速度。DVM 的测量速度用每秒钟完成的测量次数来表示。它直接取决于 A/D 转换器的转换速度,一般低速高精度的 DVM 测量速度为每秒几次至每秒几十次。高速的 DVM 测量速度可达每秒一百万次以上。

(3) 输入特性。输入特性包括输入电阻和输入偏置电流,输入电阻一般不小于 $10\text{M}\Omega$,高准确度的可优于 $1000\text{M}\Omega$,通常在基本量程时具有最大的输入电阻。输入偏置电流是指由仪器内部产生的表现在输入端的电流,应尽量使该电流减小。

(4) 显示位数。显示位数是表示 DVM 精密程度的一个基本参数。DVM 的显示位分为完整显示位和非完整显示位。一般的显示位均能够显示 0~9 的数字,而在最高位上,可以采用只能显示 0 和 1 的非完整显示位,俗称半位。如两个五位的 DVM,一个是完整显示位,那么它的最大显示值为“99999”;另一个是非完整显示位,它的最大显示值只有“19999”。

(5) 抗干扰能力。DVM 的测量准确度和分辨率是在忽略内外干扰的条件下提出的，由于 DVM 的灵敏度很高，在实际测量中，DVM 会受到内部元器件的噪声或外部电磁感应及电源等影响，因而干扰抑制能力成为一个重要指标。根据干扰信号的加入方式不同，DVM 的干扰分为共模干扰和串模干扰两种。仪器中采用共模抑制比和串模抑制比来表示 DVM 的抗干扰能力。一般共模抑制比为 80dB~150dB；串模抑制比为 50dB~90dB。

(6) 固有误差或工作误差。DVM 的固有误差通常用绝对误差表示。

$$\Delta U = \pm (a\%U_x + b\%U_m)$$
$$\Delta U = \pm a\%U_x \pm \text{几个字}$$

其中 U_x 为测量示值， U_m 为该量程满度值， $a\%U_x$ 称为读数误差。 $b\%U_m$ 称为满度误差，它与被测电压大小无关，而与所取量程有关。选定量程后，显示结果末位 1 个字所代表的电压值也就固定了，因此满度误差通常用正负几个字表示。

6.2.3 数字电压表

目前市场上出售的数字电压表很多，本节以 SX1842 数字电压表（图 6-2）为例，简单介绍其性能指标及工作原理。



图 6-2 SX1842 数字电压表

它是一种高分辨率（1μV）的四位半直流数字电压表，采用大规模集成 A/D 转换器、低噪声运算放大器及便携式塑料机箱。高集成度及合理的结构使该表能达到较高的可靠性，即使维修也极其方便。整个仪器采用 DC-DC 逆变器电源供电电压浮置屏蔽。因此能有较高的抗干扰能力。它是工厂、实验室、科研等部门采用的中等精度且宽电压范围测量的通用仪器，也可作为不同传感器的二次仪表。

1. SX1842 主要性能指标

最大显示	19999
测量范围	1μV~1000V
固有误差	±0.025%读数±1 个字

分辨力	1 μ V
采样速度	2.5 次/秒
输入电阻	$\geq 10\text{M}\Omega$

2. 工作原理

SX1842 由双积分A/D转换、量程转换及前置放大、DC-DC隔离电源 3 个单元电路组成。双积分A/D转换是在一个测量周期内用同一个积分器进行两次积分，积分对象分别是被测电压 U_x 和基准电压 U_r ，先对 U_x 定时积分，再对 U_r 定值积分。通过两次积分的比较，将 U_x 转换成与之成正比的时间间隔。由于测量结果所反映的是被测电压在采样期间 T_1 内的平均值，故串入被测信号中的各种干扰成分将通过积分过程而减弱。故这种A/D转换器的抗干扰能力强，但转换速度较低。

3. 注意事项

如需高精度测量，仪器预热 30 分钟，“ μV_0 ”孔为 20mV 量程零点调整孔，可用小型螺丝刀调整。

一般测量时可将保护端与低端连接后作为低端，若在共态干扰较强的点上（可通过试验确定，一般认为读数显示稳定，测量数值最小为佳）。当整个显示出现闪烁时，为输入过载，应立即向高量程转换。

6.3 频率的测量

在电子技术领域内，频率与电压一样，也是一个基本参数。过去测量频率时，主要使用吸收式频率计、外差频率计及频率电桥等。目前多用频率仪（也可称电子计数器、通用计算器及计数器等）测频。它具有测量精度高、速度快、自动化程度高、操作简便及直接显示数字等特点，尤其是与微处理器相结合，实现了程控化和智能化，构成智能化计数器。目前，电子计数器几乎取代了模拟式测量仪器。

6.3.1 频率测量

1. 频率和周期的基本概念

生活中的“周期”现象人们早已熟悉。如一年四季的交替更换、钟摆的摆动等周而复始重复出现的事物或事件都是确定的周期现象。随着无线电技术的发展与普及，“频率”也成为广大群众所熟悉的物理量。调节收音机上的频率刻度盘可选听到自己喜欢的电台节

目；调节电视机上的微调旋钮可使电视机获得清晰的图像效果，这些已成为人们的生活常识。那么，频率和周期的定义是什么呢？

频率就是指周期信号在单位时间内重复的次数。周期则是指出现相同现象的最小时间间隔。如某一信号在 T 秒时间内重复变化了 N 次，则该信号的频率 f 为：

$$f = N/T$$

通常 T 取 1s 或其他十进制时间，如 10s、0.1s、0.01s 等。

2. 频率测量的特点

(1) 测量精度高。在时频计量中由于采用了以“原子秒”和原子时定义的量子基准，使得频率测量精度远远高于其他物理量的测量精度。

(2) 自动化程度高。仪器的数字化是自动化的基础，而频率测量极易实现数字化。电子计数器利用数字电路的各种逻辑功能很容易实现自动重复测量、自动选择量程及测量结果自动显示等。

(3) 测量速度快。由于数字式仪表实现了测量自动化，因此，不但操作简便，而且大大加快了测量速度。

(4) 测量范围广。信号可通过电磁波传播，极大地扩大了频率的比对和测量范围。例如 GPS 卫星导航系统可以实现全球范围的频率的比对和测量范围。

(5) 频率信息的传输和处理比较容易。例如通过倍频、分频、混频和扫频等技术，可以对各种不同频段的频率实施灵活机动的测量。

(6) 应用范围广。现代化科技所涉及的频率范围是极其宽广的，从百分之一赫兹甚至更低频率开始，一直到 10^{12} 赫兹以上。

3. 频率测量的基本方法

常用的频率测量方法分为如下几类：比较法、直读法和计数法。比较法是将被测频率信号和已知频率信号相比较，通过观、听比较结果，获得被测信号的频率。属于比较法的有：拍频法、差频法及示波法。直读法是利用电路频率特性测量的，它包括电桥法和谐振法两种。计数法是利用电子计数器测量频率，有电容充放电式及电子计数式两种。由于比较法和直读法是模拟式测频，计数法属于数字式测频，所以本节主要介绍计数法测频。

6.3.2 用电子计数法测量频率

1. 电子计数法测量频率的原理

电子计数器是一种最常见、最基本的数字化仪器，在数字化仪器中，出现最早，使用最为广泛。它是利用数字电路技术对在给定时间内通过的脉冲进行计数并显示其结果，也是其他数字化仪器的基础。

电子计数器按照功能可以分为通用计数器、频率计数器、时间计数器和特种计数器 4 种；按照用途分为测量用计数器和控制用计数器。其中通用计数器、频率计数器和时间计数器属于测量用计数器；特种计数器属于控制用计数器。

电子计数器测频是严格按照频率的定义进行的。它在某个已知的标准时间间隔 T_s 内，测出被测信号重复的次数 N ，然后用下列公式计算出频率。

$$f = N/T_s$$

它一般由输入通道、计数器、逻辑控制、显示及驱动电路构成。图 6-3 为通用电子计数器测频原理框图。

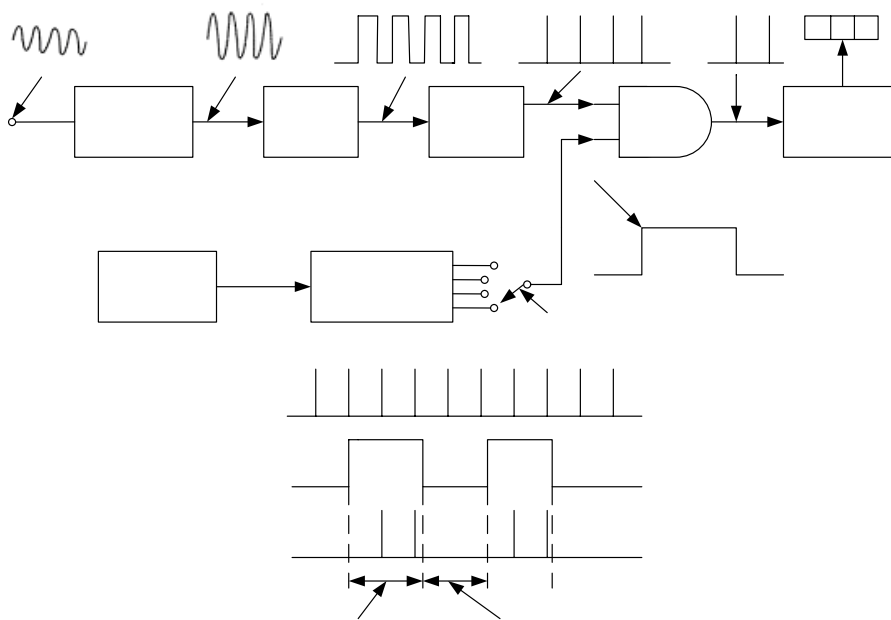


图 6-3 电子计数器测频原理框图

从测量端子输入的信号输入调节器中调节、输入调节器于测量的值，由波形整形整形后变为方波，经微分电路变为脉冲波后加到 AND 电路（“与”门）上。另一方面由石英晶体振荡器产生高稳定的振荡信号，经分频器分频后产生准确的时间间隔 T_s （即产生门控方波）。用这个 T_s 作为门控信号，控制门开启时间，并把这个门控方波信号也加到 AND 电路（“与”门）上来。在门控方波所确定期开门时间（即 T_s ）内，AND 电路输出计数脉冲，并由计数器对计数脉冲进行二进制计数，其输出经译码器转换为十进制数。最后由显示电路将测量结果显示出来。如果开门时间 T_s 为 100ms，计数器计数值 N 为 36，则被测频率 f 为： f

标准晶体
振荡器

标准时间发生
(分频器)

$=36/0.1=360\text{Hz}$ 。

2. 电子计数法测量频率的误差

用电子计数法测量频率，误差来源有 3 个：量化误差、触发误差和标准频率误差。

(1) 量化误差亦称计数误差，是指在进行频率的数字化测量时，被测量与标准单位不是正好为整数倍，再加之闸门开启和关闭的时间和被测信号不同步（随机的），因此量化过程中有一部分时间零头没有被计算在内，使电子计数器出现 ± 1 误差。为减少量化误差对测量结果的影响，要选择合适的开门时间，使得计数值尽量大。

(2) 触发误差亦称转换误差，是指在门控脉冲受到干扰时，由于干扰信号的作用使触发提前或滞后所带来的误差。误差的大小与被测信号的大小和转换电路的信噪比有关。当用电子计数器测量频率时，为减小触发误差，应尽量提高信噪比，以减小干扰的影响，调整仪器时应尽量不使信号衰减过大。

(3) 标准频率误差是由于标准信号不准而产生的测量误差。由于时基信号是由石英晶体振荡器产生的高稳定的振荡信号经过分频器分频后产生的，所以标准频率误差与石英晶体振荡器的稳定性有关。频率的稳定性可用每日、每周或每月的频率最大变化率来表示，例如 $\pm 2 \times 10^{-8}/\text{日}$ 、 $\pm 3 \times 10^{-7}/\text{周}$ 、 $\pm 5 \times 10^{-7}/\text{月}$ 等，一般在晶体振荡器的规格表中可以查到。

6.3.3 电子计数器测量频率比

频率比的测量是指测量两个被测信号的频率之比。在调试数字电路时（如计数器、分频器、倍频器等）往往需要测量输入信号和输出信号之间频率的相对关系。实际上，电子计数器测频时也是测量频率比，只不过其中一个频率是标准频率。设其中一个信号的频率为 f_A ，另一个为 f_B 。测量 f_A/f_B 的原理如图 6-4 所示。

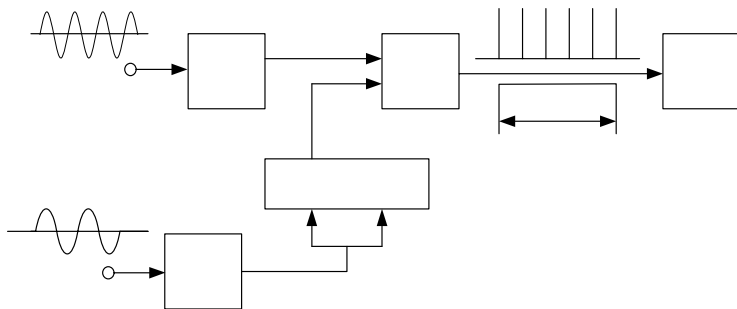


图 6-4 频率比的测量原理图

两个信号中频率高的信号接 A 端，经放大整形后作计时脉冲，频率低的信号接 B 端，经放大整形后接到门控电路的输入端作为开门信号。得到的读数即为两个频率的比值。

6.3.4 频率测量范围的扩展

通用计数器能够直接计数的频率上限一般在 1.5GHz 以下。为了能测量高于 1.5GHz 的频率信号，产生了很多种扩大频率范围的方法，主要有变频法、置换法、置换变频法和取样法 4 种。这里我们只介绍一种被称为变频法扩大频率测量范围的基本原理，如图 6-5 所示。

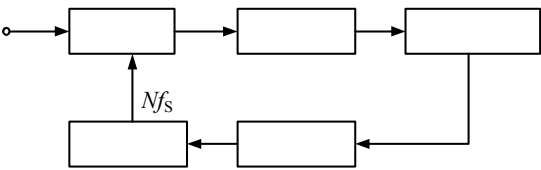


图 6-5 变频法测量原理框图

它利用电子计数器内的晶振频率为基准频率 f_s ，经过阶跃二极管（谐波发生器）产生丰富的谐波，并送入谐振腔（谐波滤波器）。当被测信号 f_x 输入时，控制器开始扫描，使谐波滤波器由低到高地选出标准信号的谐波分量 Nf_s ，并与输入信号在混频器中混频出差频 f_i 。当被选出的第 N 次谐波使 $f_x - Nf_s$ 处在计数器的计数频率范围内时，计数器开始计数得到差频值。由于谐波次数是已知的，所以被测频率 f_x 为：

$$f_x = Nf_s + f_i$$

式中， f_s ——基准频率；
 N ——选用谐波次数。

6.3.5 电子计数器（实例）

GB3382 型频率计通过使用微处理器技术，实现了智能化测量。它具有测量精度高（9 位/秒），测频范围宽（>3000MHz），速度快，闸门时间可选，可进行自检、频率测量、周期测量、累加器计数等特点，如图 6-6 所示。



图 6-6 GB3382 型频率计

输入

f_x

混频器

谐波滤波器

差频

谐波

1. 主要性能指标

- (1) 频率测量范围 A 通道 1Hz~100MHz; B 通道 100MHz~3GHz。
- (2) 周期测量 10ns~1s。
- (3) 输入阻抗 A 通道 1MΩ; B 通道 50Ω。
- (4) 显示位数 前 10 位数显, 后 2 位指数 (共 12 位显示)。
- (5) 门控时间 10ms、100ms、1s、10s。
- (6) 外频标输入 10MHz。

2. 基本工作原理

由于 GB3382 型频率计采用倒数计数器, 所以测量精确度高, 测量范围广。倒数计数器采用多周期同步测量的原理, 即测量输入信号的多个 (整数个) 周期值, 再进行倒数运算而求得频率。图 6-7 是倒数计数器的原理图。

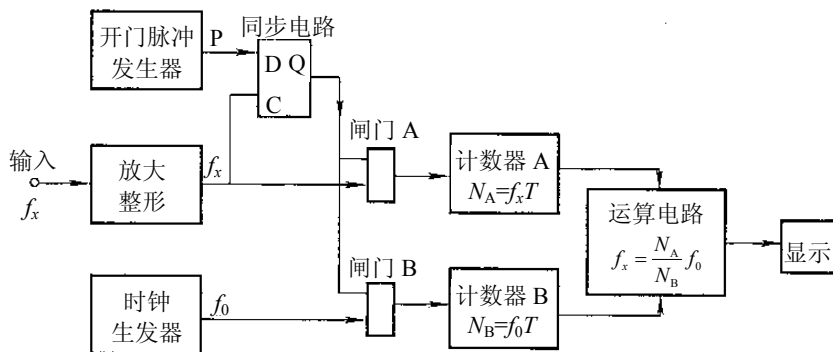


图 6-7 倒数计数器的原理图

f_x 为输入信号频率, f_0 为时钟脉冲的频率。A、B 两个计数器在同一闸门时间 T 内分别对 f_x 和 f_0 进行计数, 计数器 A 的计数值 $N_A = f_x T$, 计数器 B 的计数值 $N_B = f_0 T$, 由于 T 的值是相同的, 所以被测频率为 $f_x = f_0 \times (N_A / N_B)$ 。由于同步电路的作用, 所以 N_A 不存在量化误差。虽然 N_B 存在量化误差, 但在时钟频率很高的情况下, 其量化误差很小, 而且和被测频率无关, 所以测量精度较高。

3. 注意事项

- (1) 每次测试前应先对仪器进行自校检查, 当显示正常时再进行测试。
- (2) 当被测信号的信噪比较差时, 应降低输入通道的增益。
- (3) 为了提高测量的准确度, 当被测频率较低时, 应尽量选长的闸门时间。
- (4) 为保证机内晶体振荡器的稳定, 应避免温度有大的波动和机械振动, 避免强的工业电磁干扰, 仪器接地应良好。

6.4 时间的测量

时间是国际单位制中 7 个基本物理量之一。它的含义有两个：一个是指“时刻”，即某事件何时发生；另一个是指“时间间隔”，即某个事件相对于一开始时刻持续了多久。由于“时间”具有流逝性，即时间总是在改变的，不可能让其停留或保持住，所以对时间的测量一般都是测量时间间隔。常见的时间测量有以下几种。

6.4.1 周期的测量

电子计数器测量周期的原理与测量频率的原理类似，如图 6-8 所示。

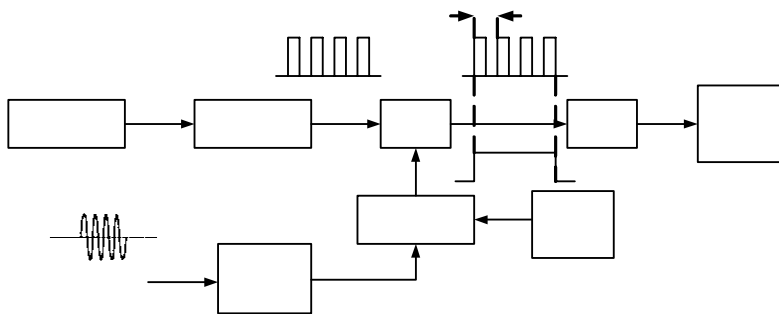


图 6-8 电子计数器测量周期原理图

测量周期时，被测信号放大整形后成方波脉冲，形成时基，控制闸门，使主门开放的时间等于被测信号周期 T_x ；晶体振荡器产生标准振荡信号 f_c ，经 k （ k 为分频系数）分频输出频率为 f_s 、周期为 T_s 的时标脉冲；时标脉冲在主门开放时间进入计数器，计数器对通过主门的脉冲个数进行计数，若计数值为 N ，则被测周期为：

$$T_x = N \times T_s$$

6.4.2 长时间的测量

长时间的测量，即外控时间测量，测量原理如图 6-9（a）所示。按动按钮 S_1 使主门开启，开放时钟脉冲，计数器计数；过一段时间按动按钮 S_2 ，使主门关闭，计数器停止计数。波形关系如图 6-9（b）所示。如果 S_1 和 S_2 由光电等信号控制，则可用于体育运动短跑项目的自动计时等场合。

晶体振荡

分频电路

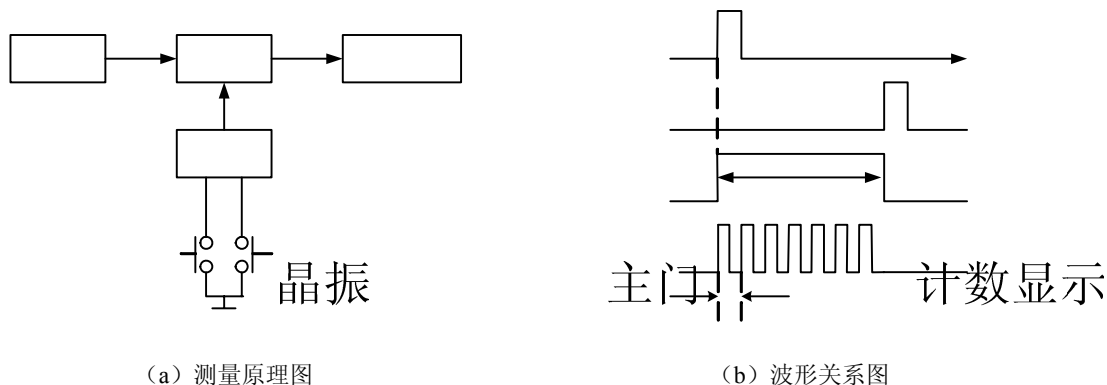


图 6-9 长时间的测量

6.5 相位的测量

相位的测量通常指对两个频率相同的正弦信号之间的差值的测量。

频率相同的两个正弦信号电压，其相位差也就是初相值之差。如 $u_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \phi_1)$ ， $u_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \phi_2)$ ，其相位差 $\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2$ 。若 $\Delta \phi > 0$ ，则 u_1 超前 u_2 ；若 $\Delta \phi < 0$ ，则 u_1 滞后于 u_2 。而频率不同的正弦电压之间的瞬时相位差是时间 t 的函数，它随时间的改变而改变。

测量相位差的方法很多，主要有下列几种：

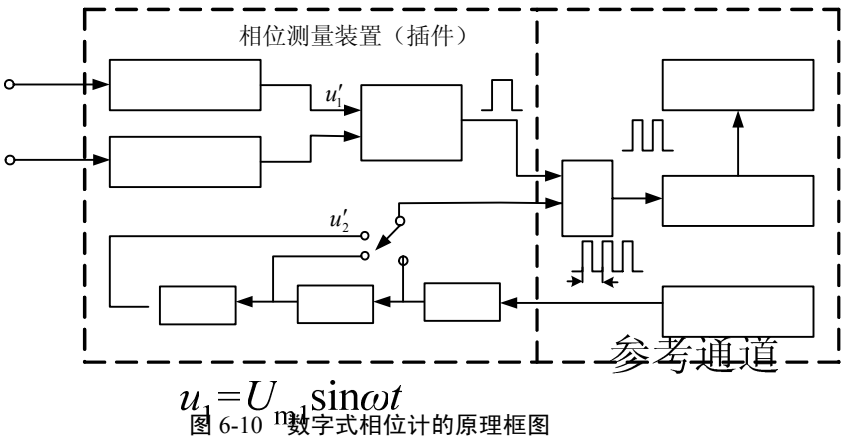
- (1) 相位差转换为时间间隔，先测量出时间间隔再换算为相位差。
- (2) 把相位差转换为电压，先测量出电压再换算为相位差。
- (3) 与标准移相器的比较（零示法）等。

本节主要介绍相位差转为时间间隔测量的测量方法。

6.5.1 脉冲计数法测相位

目前广泛使用的是直读式数字相位计，其原理是时间间隔测量法。这种方法就是先应用电子计数器测量两个同频正弦波信号的周期 T 和过零点的时间差 ΔT ，然后用 $\phi = 360^\circ \times (\Delta T / T)$ 换算为相位差，式中： ϕ 为要测的同频正弦波信号的相位差； ΔT 为两被测信号过零点的时间差； T 为两个被测信号的周期。

以上为时间间隔测量的原理。数字式相位计的原理框图如图 6-10 所示。



被测信号 u_1 和 u_2 分别经参考通道和测试通道变换为尖脉冲信号，去控制脉冲鉴相器产生宽度等于 ΔT 的闸门信号以控制主门的启、闭。时基信号产生标准频率经脉冲形成电路变换为窄脉冲，在主门开启时通过主门计数器，得到计数值，再经过译码器，最终显示出被测两信号的相位差。

6.5.2 数字相位计（实例）

NGX 智能工频相位仪如图 6-11 所示。它是集高技术、高精度、高可靠性于一体的电力相位及工频测试仪器，在国内同类产品中居领先地位。该仪器囊括了电力相位测试的全部项目，包括距离保护中的最大灵敏度、转移阻抗角等。并可以在不断开二次回路的情况下进行保护测试，如做六角图及母差保护等测试。另外，该仪器还具有完善的自动校正功能，不但可自动消除因通道或频率的变化漂移而产生的对相位测试的影响，而且可消除谐波对相位测试的影响，以保证长期使用的高精度。



图 6-11 NGX 智能工频相位仪

1. 主要技术指标及性能

(1) 工频频率测试

输入信号：AC 1V~500V 正弦波

测试范围：16.00Hz~99.99Hz

绝对误差：0.01Hz

(2) 工频相位测试（表 6-1）

×10

表 6-1 工频相位测试指标

指 标 测试方法	测 试 范 围	精度 等级	输 入 信 号		电压输入阻 抗 (kΩ)	电流输入 阻抗 (Ω)
			电压 (V)	电流 (A)		
U_1-U_2	0.0~360.0	0.2	1~500		>500	
U_1-I_3	0.0~360.0	0.2	1~500	0.01~10	>500	见说明
适用范围：相位的高精度测试，如现场做最大灵敏度、转移阻抗及相位变送器等测试						
U_1-I_2 (I_2 用测试钳)	0.0~360.0	1.0	1~500	0.1~5.0	>500	0
I_1-I_2 $I_1、I_2$ 均用测试钳	0.0~360.0	1.0		0.1~5.0		0

适用范围：用于电气回路的不开路测试，如在二次回路中做六角图和母差保护测试等

说明：第二种测试方法电流输入阻抗 0.01A~0.5A 为 100Ω，0.5A~2.5A 为 2Ω，2.5A~5.0A 为 4Ω，5.0A~10.0A 为 0.2Ω，

显示方式：5 位数码液晶显示屏。

- (3) 工作电源 AC 220V±10% 50Hz±20%
- (4) 谐波抑制 输入信号波形失真不大于 5%时，不影响测量精度。
- (5) 工作环境 环境温度：-10℃~40℃
 相对湿度：≤85%RH
- (6) 工作时间 不间断持续工作

2. 面板示意图（图 6-12）及说明

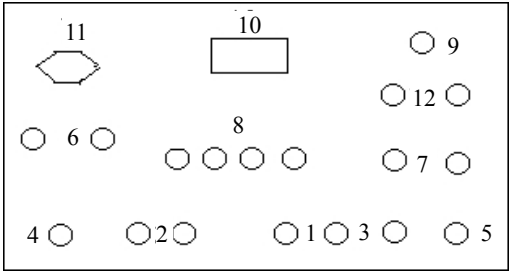


图 6-12 NGX 工频相位计面板示意图

- (1) 电源开关
- (2) 通道 I 电压—电流切换开关 (U_1-I_1)
- (3) 通道 II 电压—电流切换开关 ($U_2-I_1I_3$)
- (4) 通道 I 输入插座 (I_1)
- (5) 通道 II 输入插座 (I_2)
- (6) U_1 输入接线柱
- (7) U_2 输入接线柱
- (8) 功能操作开关
- (9) 电流换挡开关
- (10) 显示表头
- (11) 电源插座
- (12) 电流输入接线柱 I_3

3. 使用方法与注意事项

仪器使用前应先进行外观检查,在通电时应注意,先插上电源插头,后打开电源开关;关机时,先关闭电源开关,后拔电源插头。

(1) 开机清零与复位

打开电源开关,首位数码管显示“P”,表明仪器经过自检进入准备状态。若需清零或复位轻触“清零”键,即可恢复到准备状态。

(2) 相位测试及记忆

在接入信号后,轻触“相位”键,就进入相位连续测试状态,此时显示值跟踪相位不断变化,再按一次该键即可进入锁存状态,显示值稳定不变,以便于记录,这样就完成了一次测试操作。进行第二次测试时,再按一下该键,此时末位锁存序号自动加“1”,表示进入下一次测试状态,该机一共可存储10次测试值(0~9)。

如操作错误出现异常,可按“清零”键进行复位重新测试,若要调出锁存值,轻触“循显”键一次则得一次锁存值,若轻压该键不放,则依次显示出全部锁存值,每次停留时间为2秒。

(3) 注意事项

- ① 连线完毕,测量过程中不能触摸面板上的接线柱或三芯航插,以免触电。
- ② 输入信号必须在量程范围内,否则将使误差增大,甚至毁坏仪器。
- ③ 进行相位测试时以右通道输入信号 X_R 为基准量,读出的角度应是左通道输入信号 X_L 超前 X_R 的角度。
- ④ 本仪器系精密仪器,应小心轻放,注意防潮,避免碰撞等冲击,以免影响测试精度和使用寿命。
- ⑤ 使用钳形夹时注意电流进出方向,钳形夹上“•”表示电流流出方向。

6.6 小 结

本章重点介绍利用信号幅度随时间做离散型变化的数字量所进行的测量方法及仪器,其特点是将模拟量通过各种变换器转换成数字量,并以数字形式显示。具体介绍了电压的测量、频率的测量、时间的测量和相位的测量等。

要求大家通过对本章的学习,掌握电压测量的基本要求,会用电压表测电压;了解频率测量的特点,掌握频率测量的基本方法;会用电子计数法测量频率、周期;了解示波法测量相位差的方法,掌握相位差转为时间间隔测量的测量方法。

6.7 思考题

1. 试说出模拟式测量和数字式测量的特点及数字式测量的优点。
2. 数字电压表的主要技术指标是什么，它们是如何定义的？
3. 下面给出 4 种数字电压表的最大计数容量：

(1) 9999; (2) 19999; (3) 69999; (4) 1999

试分别说明它们是几位数字电压表。如果它们的最小量程均为 0.2V，试问它们的分辨率分别是多少？

4. 频率测量的主要特点有哪些？
5. 频率测量主要有哪些方法？
6. 相位测量的基本方法有哪些？
7. 试说出基于时间间隔测相位的原理。

第 7 章 时域与频域的测量及仪器

7.1 概 述

电信号可以用它的幅度随时间的变化规律来表示，也可用该信号中含的各种频率分量来表示。因此对电信号的测量可分为两类：时域测量和频域测量。

时域测量是测量输入信号随时间而变化的信号值，是信号幅度与时间的关系，通过观察信号幅度随时间变化的波形，并测量它的一些参数。时域测量也叫做瞬时测量，主要是测量被测量随时间的变化规律，如用示波器观察脉冲信号的上升沿、下降沿、平顶降落等脉冲参数以及动态电路的暂态过程。

对电路而言，时域特性是指瞬态响应特性的测量，即将一定幅度的激励信号输入被测电路，用示波器在电路输出端观察信号波形，可以发现此信号通过电路后放大、缩小或畸变的现象。这种方法常常用来确定被测电路工作在线性区或非线性区，电路的增益和衰减的值是多少，并可判断该电路的设计是否符合要求，有助于把电路调整到最佳工作状态。

频域测量则是测量输入信号随频率而变化的信号值，是信号幅度与频率的关系。频域测量也称为稳态测量，主要目的是获取待测量与频率之间的关系。如用频谱分析仪分析信号的频谱，测量放大器的幅频特性、相频特性等。

频率响应特性的测量就是把幅度恒定、频率在一定范围内变化的一定量激励信号输入到被测电路，常用频率特性测试仪观测电路输出电压或电平及相位随输入信号频率变化的特性。

7.2 通用示波器

示波器（oscilloscope）是电子示波器的简称，是一种用途非常广泛的电子测量仪器。它利用阴极射线管（cathode-ray tube, CRT）把我们肉眼看不见的抽象的电信号变化过程转换成可以直接观看的波形，并显示在荧光屏上，从而对电信号进行分析并测量其参数。掌握示波器的原理及应用方法，对于器件选用、信号与电路分析和电路设计都具有十分重要的意义。

示波器的种类、型号很多，从性能和结构上大致分为以下几类：

1. 通用示波器

通用示波器是采用单束示波管的示波器，有单踪、双踪与多踪型之分。单踪示波器在屏幕上只能显示一个信号的波形；双踪示波器在屏幕上可显示两个信号的波形；多踪示波器在屏幕上可显示两个信号以上的波形。如示教示波器、高灵敏示波器及慢扫描示波器（超低频示波器）等，它们都能对电信号进行定性、定量测量。

2. 多束示波器

多束示波器指采用多束示波管的示波器。屏幕上显示的每个波形都由单独的电子束产生，能同时观测、比较两个以上的波形。

3. 取样示波器

取样示波器指根据取样原理将高频和超高频信号转换成低频信号，并运用通用示波器的基本原理观测信号的示波器。它一般用于观测频率高且速度快的脉冲信号。

4. 记忆示波器和存储示波器

记忆示波器和存储示波器指具有存储信息功能的示波器。虽然记忆示波器和存储示波器存储元件不同，但都能对单次瞬变过程、非周期现象及低重复频率的信号进行观测，还可用来比较在不同时间和不同地点观测到的信号。

5. 特种示波器

特种示波器指满足特殊用途或有特殊装置的示波器。如用于监测和调试电视系统的电视示波器，主要用于调试彩色电视机中有关色度信号幅度和相位的矢量示波器；用于观察晶体管特性曲线并可读出参数的晶体管特性图示仪；用来观测调试计算机和数字系统的逻辑示波器等。

示波器种类繁多，但最基本的还是通用示波器，本节将重点介绍其工作原理。

7.2.1 波形显示与技术指标

电压、电流等电量可以用指示式仪表或数字式仪表测量，但在研究电量随时间变化的规律时，必须使用波形观测的仪器，通常使用示波器。示波器可以把肉眼看不到的电信号在示波管上以静止波形显示出来。如果被测信号为正弦波，用示波器可以了解波形是否出现畸变或含有其他杂波。当观测方波或脉冲波时，可以对波形宽度和脉冲幅值出现的时间等进行测试。对这些观测项目的测试是其他仪器所不能替代的。

各种示波器的内部电路形式各异，但基本电路大致分为 3 大部分：Y 通道（垂直系统）、X 通道（水平系统）和示波管，此外还包括电源电路，用来产生示波管和仪器电路中需要的多种电源。

如图 7-1 所示是一通用示波器的电路框图，该示波器型号为 DF4328。

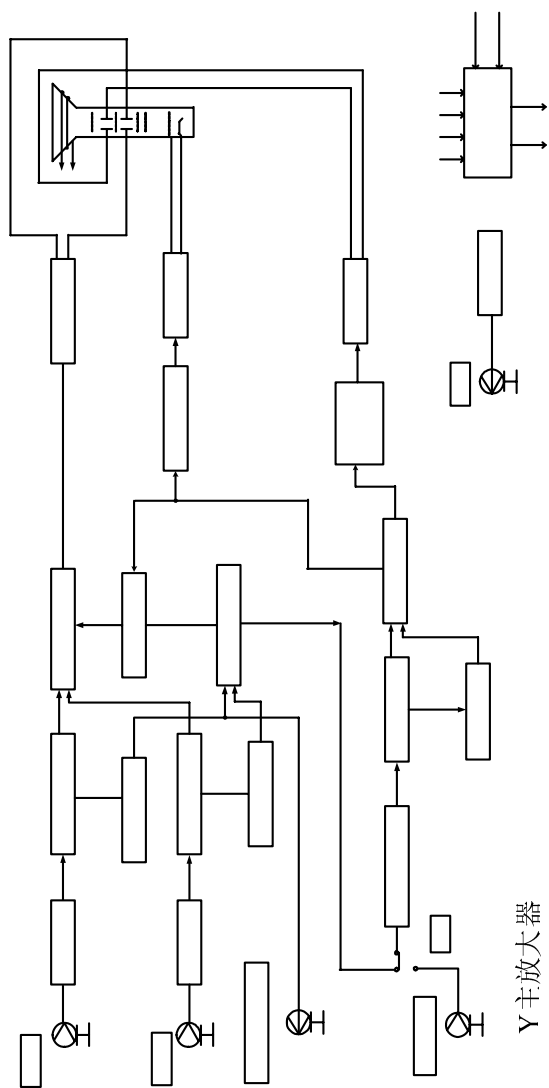


图 7-1 DF4328 型双通道示波器结构原理图

1. 示波管

示波管又称阴极射线管（CRT），是示波器的核心部件，主要由电子枪、偏转系统、荧光屏组成。

高压电路
Y 主放大器
Z 轴放大器

光屏组成,基本结构如图 7-2 所示。它能够把电信号转换成光信号并显示出来,和电视机的显像管一样,是一种特殊的电子管。

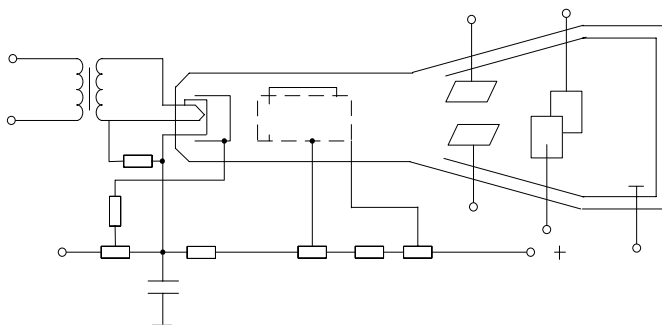


图 7-2 示波管内部结构图 B

电子枪用来产生极细的高速电子束,向内壁涂有荧光物质的荧光屏发射,荧光物质被电子束击中的部位发出光点而显示出电子束的轰击位置。而偏转系统则在被测信号的作用下控制电子束上下左右移动,从而改变电子束打击到荧光屏上的位置,描绘出被测信号的变化曲线。可以更通俗地解释为:电子枪的作用如同笔,偏转板的作用如同手,而荧光屏的作用如同纸,三者配合起来才能绘出图形。

(1) 电子枪。由灯丝 F, 阴极 K, 控制栅极 G1、G2, 第一、第二阳极 A1、A2 组成。当灯丝加热阴极后,涂有氧化物的阴极受热发射大量电子。控制栅极 G1 包围着阴极,在面向荧光屏的方向开有一小孔,让电子通过,射向荧光屏。改变 G1 对 K 的电位可以改变通过小孔的电子数目,从而调节荧光屏上光点的亮度,电位器 W1 在示波器面板上称为“亮度”(或“辉度”)旋钮。第一、第二阳极 A1、A2 在栅极 G2 一侧,与 G1 组成聚焦系统,它们的电位远高于 K,对电子束起聚焦和加速的作用,使得电子束的焦点正好在荧光屏上,焦点位置的调节通过电位器 W2 实现,在示波器面板上被称为“聚焦”旋钮。

(2) 偏转系统。位于第二阳极之后,由两对相互垂直的 X 和 Y 偏转板组成。为了描绘一幅图形,我们必须要有水平和垂直两个方向的信息。当加入信号时,各自在偏转板间形成电场,分别控制电子束在水平方向和垂直方向的偏转,其距离分别与加在偏转板上的电压大小成正比,电子束在荧光屏上显示的亮点即确定了被测信号的波形。X 偏转板上加与时间成正比的锯齿波扫描电压,因此电子束在水平方向上的偏转距离与时间成正比,这是示波器测量时间、周期等参数的原理依据,改变扫描电压的大小,可调整显示波形的宽度。Y 偏转板上加变换后的被测信号电压,使电子束产生与信号电压成正比的偏移,这是示波器测量电压等参数的原理依据。改变信号电压的大小,可调整显示波形的幅度。

(3) 荧光屏。目前使用示波管的屏面通常是矩形平面,内表面沉积一层磷光材料构成荧光膜。在荧光膜上常又增加一层蒸发铝膜。高速电子穿过铝膜,撞击荧光粉而发光形成亮点。铝膜具有内反射作用,有利于提高亮点的辉度。铝膜还有散热等其他作用。当电子

停止轰击后,亮点不能立即消失而要保留一段时间。亮点辉度下降到原始值的10%所经过的时间叫做“余辉时间”。余辉时间短于 $10\mu\text{s}$ 为极短余辉、 $10\mu\text{s}\sim 1\text{ms}$ 为短余辉、 $1\text{ms}\sim 0.1\text{s}$ 为中余辉、 $0.1\text{s}\sim 1\text{s}$ 为长余辉、大于 1s 为极长余辉。一般的示波器配备中余辉示波管;高频示波器选用短余辉;低频示波器选用长余辉。

由于所用磷光材料不同,荧光屏上能发出不同颜色的光。一般示波器多采用发绿光的示波管,以保护人的眼睛。

2. 波形显示原理

由偏转系统的分析可知,电子束通过垂直(或水平)偏转板间电场后,光点在荧光屏上垂直(或水平)方向偏转的距离,正比于加在垂直(或水平)偏转板上的电压,这是示波器能够观测被测信号波形的基础。

当仅在垂直轴加被测电压(通常是正弦波信号)时,光点沿上下直线移动,如图7-3(a)所示,荧光屏显示一条垂直亮线;当仅在水平轴加一随时间成线性变化的锯齿波电压时,光点在水平方向慢慢自左向右移动,如图7-3(b)所示,荧光屏上显示一条水平亮线;当两个方向同时加上电压信号时,光点按力的平行四边形法则合成轨迹,反映两个电压信号的关系,如图7-3(c)所示;实际的锯齿波扫描电压信号,其光点从屏幕右端返回起始点需要一个扫描回程时间 t_2 ,如图7-3(d)所示,由于此时间不能忽略(理想状态下才为零),在此时间段内屏幕上会显示返回线,这将干扰观测,因此必须设置电路进行消隐。

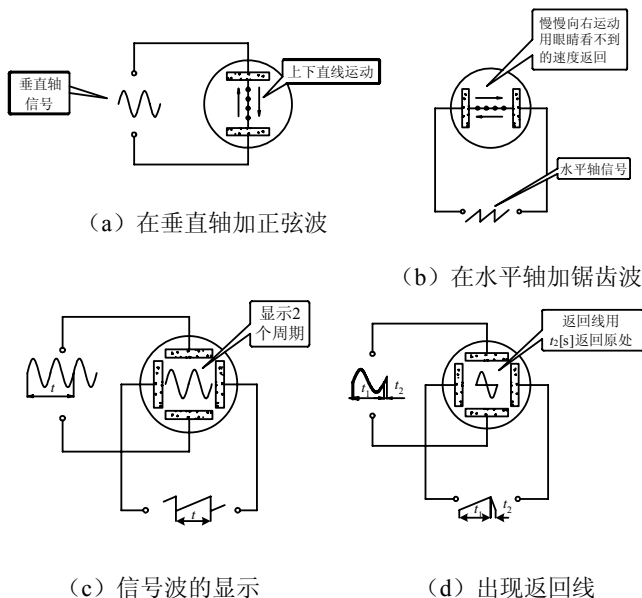


图 7-3 示波器波形显示原理

3. 主要技术指标

(1) 频率响应(即频带宽度)。示波器的带宽就是Y通道的工作频率范围 BW ,即对应于基准频率下降3dB时,示波器输入信号在屏幕上所显示图像的幅度的范围,通常表示为上、下限频率 f_H 和 f_L 之差, $BW = f_H - f_L$ 。目前示波器的 f_L 一般从零开始,所以频带宽度可用 f_H 表示。

(2) 上升时间。对于脉冲等瞬变信号而言,通道的时域响应(过渡特性)更为重要,对Y通道主要是上升时间 t_r ,表示为在Y通道输入端加一个理想的阶跃信号,屏幕上显示波形从稳定幅值的10%上升到90%所需时间。由于示波器中放大器是线性的,故而存在如下关系: $BW \cdot t_r = 0.35$ (MHz · μ s)。

以上两项指标是示波器的重要特性,基本上限定了可测周期性连续信号的最高频率和脉冲信号的最小宽度。

(3) 偏转因数。指输入信号在无衰减情况下,亮点在屏幕上偏转一度所需信号电压的峰—峰值,单位为mV/div。此数值越小,波形幅度就越大。这项指标反映示波器观察微弱信号的能力。

(4) 输入阻抗。即被测电路的等效负载,一般可等效为输入电阻和输入电容的并联。由于示波器是一种宽带仪器,因此常把输入电阻和电容单独列出,测量高频信号时要考虑电容的影响。

(5) 扫描速度。常用时基因数表示。时基因数指在波形无扩展情况下亮点在X方向偏移1cm或1div所需要的时间。时基因数越小,扫描速度就越高,表示展开高频信号或窄脉冲信号波形的能力愈强。在扫描速度较低的情况下,才能观察缓慢变化的信号。因此,示波器扫描速度的范围越宽越有利于观察信号。

(6) 输入方式。指被测信号送入Y通道的输入耦合方式。有直流(DC)、交流(AC)和接地(GND)3种。直流耦合即直接耦合,将输入信号所有成分都加在示波器上。交流耦合可隔离被测信号中的直流及慢变化分量,抑制工频干扰,便于测量高频及交流瞬变信号。但是限制了示波器的实际下限频率,测持续周期长的脉冲信号时,会使波形失真。接地耦合将示波器Y通道输入端短路,一般在测量直流电压时,确定零电平位置时选用。

(7) 触发来源。触发信号可取自Y放大器放大后的被测信号,这种方式叫内触发(INT);也可用外接信号作为触发信号,即外触发(EXT);若取自电源电压(50Hz交流电),则称为电源触发(LINE)。

(8) 其他。表示示波管性能的指标有亮度、聚焦、余辉、屏面形状、尺寸及偏转灵敏度等。此外还有校准信号(频率及幅度)、额定电源电压、功率消耗、外型尺寸、连续工作时间和工作环境等指标。

7.2.2 Y 通道（垂直系统）

示波器的 Y 通道的作用是把被测信号衰减或不失真地进行适当放大,然后加到示波管的 Y 轴偏转板上以控制电子束的偏转,其性能的优劣直接影响到测量结果的精确度,主要由衰减电路、放大电路、频率补偿电路及延迟级等组成。

衰减电路用来衰减强信号以免显示在荧光屏上的信号过大而失真,通常由 RC 电路组成。

放大电路包括前置放大电路和输出放大电路。其作用是使示波器具有放大微弱被测信号电压的能力,使之达到适当的幅度,以驱动示波管的电子束做垂直偏转。

延迟级的作用是使被测信号延迟一段时间和扫描开始时刻同步,补偿 X 通道的时间延迟,使 Y 通道能与 X 通道配合以显示完整的波形。

整个垂直系统必须满足以下几点要求:

(1) 足够高且稳定的增益。放大器的增益由示波器能测量的最小信号(即示波器的灵敏度)和示波器垂直偏转板灵敏度的比值决定。示波器要能观测一定幅度的信号,就必须使通过垂直系统放大的信号能够驱动垂直偏转板起偏转作用,所以垂直系统必须要有足够高的灵敏度。

(2) 足够高且不失真的输出。因为在整个频带范围内的放大曲线要平坦,示波器的垂直放大电路在整个工作频带内的放大量要一致,否则在测量不同频率的信号幅度时,会产生较大的测量误差。

(3) 相移作用不明显。否则将导致被测信号的观测误差很大而不能接受。

(4) 足够宽的频带宽度。这是为了尽可能增大示波器的测量范围, Y 通道的频带宽度即示波器的带宽 BW 。

(5) 输入阻抗很高。可将被测信号以很小的失真对称地传输到 Y 偏转板上。

7.2.3 X 通道（水平系统）

示波器的 X 通道也被称为时基系统。它的作用是产生一个与时间呈线性关系的电压。当这个电压加到水平偏转板上时,能使电子束沿水平方向随时间线性偏移,形成时间基线,并且能选择适当的同步或触发信号,保持与 Y 通道输入信号间的同步关系,以确保荧光屏上所显示波形的稳定。另外, X 通道还可给示波管提供增辉脉冲。X 通道主要由触发同步电路、扫描电路及 X(水平)放大器组成。

触发电路把触发信号变换为具有陡峭前沿、幅度足够且与被测信号同步的触发脉冲。触发电路包括触发来源选择及触发信号的耦合等性能部分。

扫描电路用来产生符合要求的锯齿扫描电压,在双踪示波器中为电子开关提供交替显示的控制信号。

X 放大器用来放大扫描电压,把单端信号变为双端输出,使电子束能在水平方向满偏转。其电路结构是一宽带多级直耦放大器。它有较强的动态范围,兼有提高、扩展扫描速

度的作用,并能完成水平移位及寻迹的功能。当示波器按 X-Y 方式工作时, X 放大器成为 X 输入信号传输通道。X 放大器与 Y 放大器类似,改变放大器的增益可以使光迹在水平方向得到若干倍的扩展,即提高光点的速度;改变相关的直流电位可以使光迹在水平方向上移位。

可见,垂直通道用来放大被观测的信号,水平通道在观测随时间变化的波形时(即时域的测量)用来产生一个与被测信号同步的扫描电压。当两者一起作用时,反映在荧光屏上的光迹就是被测信号随时间变化的波形。

7.3 专用示波器

7.3.1 取样示波器

取样也称抽样或采样,是一种信息处理的过程。通过取出事物的样品来说明其整体特性。在取样示波器中也采用了类似的原理。

通用示波器的带宽由于受到各种因素的限制,不能观测 100MHz 以上的高频或超高频信号。运用取样技术,取样示波器把高频信号变成与波形相似的低频或中频信号,在荧光屏上显示出来,一般可以观测 1GHz 以上的超高频信号。

与取样原理类似,取样示波器不是直接放大被测信号,而只是每次对信号波形的一小部分取样,保持取样点的幅值,并产生一次瞬时幅值的显示。然后在延迟了一个时间段 Δt 的信号波形上再一次取样,产生新的显示标点,最后由这些取样点构成完整的波形显示。

假定 Δt 在一个周期内,那么上述方法就是在时间轴上将一个周期的波形按顺序分割成若干等份后,每次取出一部分作为样本信号,取出的样本信号幅度等于被测信号的瞬时值,宽度等于取样脉冲的宽度。取样后显示的波形是一串幅度随采样点变化的取样脉冲。这种只对一个波形采样的方法称为实时采样。

实时采样不能测量高频信号,对波形重复的高频周期信号,可以采用非实时采样的方法。即每隔 mT 个周期,分别对该周期的重复波形的对应特征点依次采样,但每次采样的位置后移一个时间段 Δt 。也就是说,采样脉冲的时间间隔变为 $mT + \Delta t$ 。因此非实时采样得到的脉冲周期大大延长,频率大幅降低,就把高频、快速信号变换为低频、慢速信号来观测。

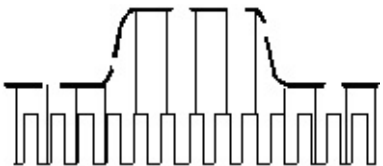


图 7-4 方波的等效时间周期取样

图 7-4 说明了方波的显示,它说明示波器上显示的是一串光点而不是通用示波器中的连续波形。示波器显示的是脉冲取样信号,而不是实际的输入信号。在每个取样脉冲的峰点,示波器的阴极射线管解除消隐而出现亮点。许多亮点就形成了显示图形。不同类型的仪器显示的点数约在 50~500 范围内变化。

可见取样示波器的的工作以重复信号为条件,但不一定要求信号具有恒定不变的重复频率。它每次测量一个周期信号的一小部分,并显示为一点,高度表示信号被取样部分的幅度。亮点的水平位置对应于取样的时间。

这样的取样技术是最常见的,一般称为顺序取样。有时也用另一种取样技术,是为了观测信号的前沿而设计的。这种系统采用特殊的电路来预测即将出现的前沿,故而被称为随机取样。

取样示波器除具有通用示波器的性能指标之外,还具有其本身特有的技术参数,简述如下。

(1) 取样密度:是反映波形显示质量的参数,表示屏幕在水平方向上单位长度内的亮点个数(单位.../cm 或.../div)。如果取样密度太低,显示波形会有闪烁现象。

(2) 等效扫描速度:取样示波器的计算扫描速度与通用示波器是不一样的。通用示波器的扫描速度是单位时间内电子束在水平方向的位移,而对于取样示波器,假设波形由 $n+1$ 个取样点组成,即被测信号波形代表的时间是 $n\Delta t$,而显示波形所占用的时间是 $mT + \Delta t$,所以用“等效”强调这种区别。定义等效扫描速度为屏幕上显示的被测信号波形所代表的时间 $n\Delta t$ 与波形在屏幕的水平方向上展宽的长度 L 之间的比值,即

$$S_{es} = n\Delta t / L$$

该指标越小,等效扫描速度就越高。

(3) 取样频率:即取样脉冲的重复频率,频率越高,越能接近真实的反映被测信号特性。

7.3.2 记忆示波器

示波器可以观测信号的瞬时变化,但在一些场合常要将现在观察的信号与以前观察的信号进行比较,需要将观测到的波形信号保存一段时间。尤其当被测信号在一秒钟内只有几次,或者信号的周期为数秒,甚至于信号只发生一次,在这种情况下,使用前面介绍过的通用示波器几乎不能观察这些信号。

因此希望示波器具有对信号波形进行存储和记忆的功能。目前具有存储和记忆功能的示波器主要有两种,即记忆示波器和数字存储示波器。

普通示波器 CRT 上的荧光物质的余辉时间小于 1ms,在有些情况下,使用特殊荧光物质的 CRT 能给出大约 300ms 的余辉时间。只要有信号照射荧光 CRT,就将不断显示信号波形。当信号去掉以后,使用普通 CRT 上的扫迹迅速变暗,而使用特殊荧光材料的 CRT 上的扫迹停留时间稍长一些。为了找到在荧光物质上保持信号轨迹的方法,采用一种称为存储示波管的特殊 CRT。这种示波管的荧光物质后面装有栅网,在栅网上充积电荷存贮电子束的路径。采用这种方法及结构组成的示波器被称为记忆示波器,如图 7-5 所示。

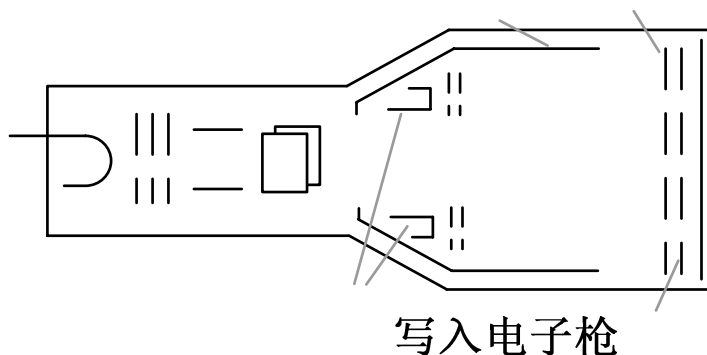


图 7-5 栅网式存储示波器结构图

存储示波管除增加了一个存储栅网外，与一般示波管的不同之处在于它内部有两种电子枪。一种是写入枪，与通用示波器中的电子枪类似；另一种是存储示波管特有的读出枪，又称为泛射枪。在记录波形之前，先清除存储栅网，给它加一定的正电压，清除网上的电子，为“写入”做好准备。然后在存储栅网上预置一定的负电压（但相对阴极仍需维持很高的正电压来对电子束加速），这个数值应该保证散射电子不能通过存储网到达荧光屏。在写入波形时，写入枪发射电子，电子束在偏转系统作用下随输入波形变化而偏转，由于存储栅网对阴极有很高的正电压，在电子束打到存储栅网上时，被轰击过的地方将产生二次电子，使此处电压上升到 0V 左右，没有被轰击的部位仍保持原来的负电压，这样存储栅网就记忆了被观测信号的波形。在读出信号时，将写入枪断开，由读出枪发出散射电子，再存储栅网电位为 0，即记忆了波形的地方，散射电子可以通过栅网到达荧光屏，而在保持负电压的地方散射电子被反弹回。这样就在荧光屏上显示了记忆的波形。

7.3.3 数字存储示波器

使用记忆示波管可以观测单次瞬变信号、超低频或慢速信号，并能保存观测波形一段时间。但它存在一些缺点：价格很昂贵又比较脆弱，并且只能在有限的时间内保持轨迹（在断电的情况下可将波形记忆一周左右）。而数字存储的方法克服了上述这些缺点。

所谓数字存储就是在示波器中以数字编码的形式来储存信号，通常采用大规模集成电路和微处理器，在微型计算机的管理下工作，靠数字的存储和读出显示被测波形。如图 7-6 是一个数字存储示波器的结构示意图，主要是以数字存储器为核心，配以模/数和数/模转换器构成，波形保存在示波管外的数字存储器中。

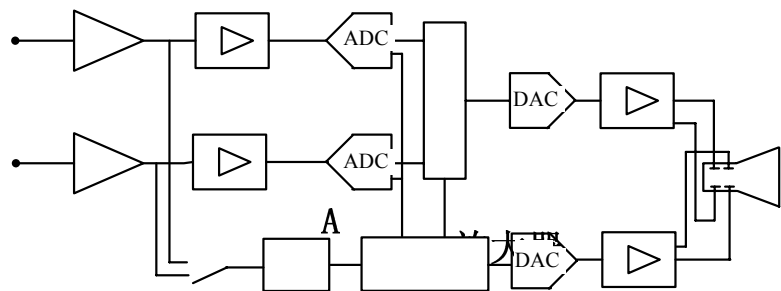


图 7-6 数字存储示波器结构图

数字存储示波器具有以下特点：

- (1) 可以显示大量的预触发信息。
- (2) 可通过使用光标和不使用光标的方法进行全自动的测量。
- (3) 可以长期储存波形。
- (4) 可以在打印机或绘图仪上制作硬拷贝以供编制文件之用。
- (5) 可以将新采集的波形和操作人员手工或示波器全自动采集的参考波形进行比较。
- (6) 可以按通过/不通过的原则进行判断。
- (7) 波形信息可用数学进行处理。

触发

7.4 频率特性测试仪

频率特性测试仪，又称为扫频仪，是观测电子电路幅频特性曲线的常用频域测量仪器。它利用示波管直接显示被测网络频率特性曲线，可以测算出被测电路的频带宽度、品质因数、电压增益、输入输出阻抗及传输线特性阻抗等参数，对网络频率特性的调整、检验及动态快速测量都非常方便。

7.4.1 测量原理

正弦信号输入到线性网络产生的稳态响应称为频率响应或频率特性。其特点是稳态响应也是正弦信号，并且具有与输入正弦信号相同的频率。而振幅和相位则是不同的，这两者均是频率的函数，分别称为振幅频率特性和相位频率特性，简称为幅频特性和相频特性，都属于线性网络的传输特性。在电子测量中还有线性网络阻抗特性的测量问题，也属于频率特性问题。在很多应用方面需要测量频率特性，如宽频带放大器、接收机的中频放大器与高频放大器、电视接收机中的视频放大器以及滤波器等，均需测量阻抗特性和传输特性。

以往对频率特性的测试，使用的是点频法：保持输入信号的幅度不变或变化量不变，逐点改变输入信号的频率（称为人工点频信号），依次测量出相应输出的数据（输出振幅或输出相位），汇总后在坐标纸上描绘出该网络的幅频特性或相频特性曲线。这种操作方法使用的仪器比较简单，但是只能得到一个近似的曲线，有可能因为测量频率间隔不够密而漏掉被测曲线上的某个细节，降低了测量结果的精确性，并且是比较费时费力的方法，现已被扫频测量技术替代。

所谓“扫频”，就是使得正弦信号的频率随时间按一定规律，在一定范围内反复扫动，该频率扫动的正弦信号称为“扫频信号”。用扫频信号代替人工点频信号，借助于示波器可以实时显示出被测电路的频率特性曲线。这种测量线性网络频率特性的仪器就是频率特性测试仪，因为使用的是扫频信号，所以通常被简称为扫频仪。

扫频仪包括 4 部分：扫频信号发生器、频率标记发生器、放大显示电路和电源，如图 7-7 所示。

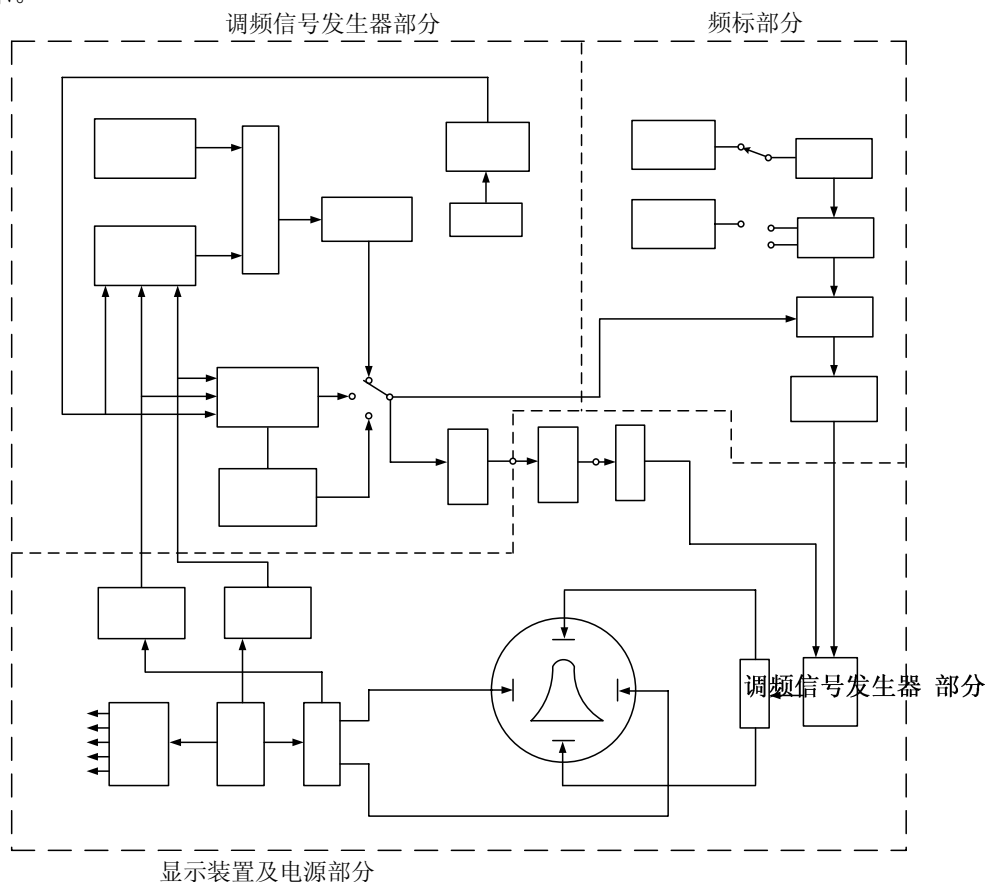


图 7-7 扫频仪原理框图
290~215MHz

混

频

哭

宽带放大
0~75MHz

1. 扫频信号发生器

它是扫频仪的关键部分，产生频率按一定规律变化的扫频信号，它的振荡频率受扫描发生器所产生的扫描电压调制，又叫做调频信号发生器。调频方式有磁调频、变容二极管、电抗管等，通常采用前两种方式来实现扫频目的。

所谓磁调频，就是用磁芯线圈作为振荡器的回路电感，利用加在磁芯励磁线圈上的调制电压来改变磁芯线圈电感量，从而达到振荡器所需频偏的目的。调制电压来自电源变压器次级，经可变相移电路，送到调制电流放大器后，作为调制电压加到扫频振荡器上，未经移相的电压加到负脉冲形成电路，形成的负脉冲加到扫频振荡器，使在扫描回程时停止振荡，这时就在屏幕上呈现一条扫描线作为 0 电平的参考。

变容二极管是基于PN结反向偏置时，结电容与偏置电压有关这一原理制成的。如图 7-8 所示是变容二极管扫频振荡器的原理图，其中VT₁组成电容三点式振荡器，变容二极管VD₁、VD₂与L₁、L₂、VT₁的结电容组成振荡回路，C₁是隔直电容，L₃是高频扼流圈。调制信号经L₃同时加至变容管VD₁和VD₂的两端，当调制电压随时间做周期性变化时，VD₁和VD₂结电容的容量也随之变化，从而使振荡器产生扫频信号。

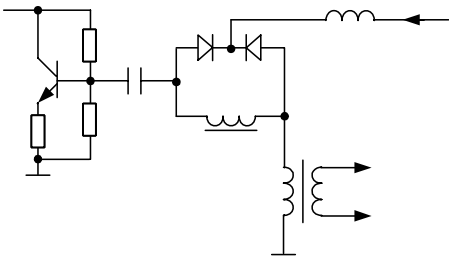


图 7-8 变容二极管扫频振荡器原理图

2. 频率标记（简称频标）

它用一定形式的标记对扫频测量中所得到的图形的频率轴进行定标，即利用频标来确定图形上任意点的频率值。在扫频仪调试被测电路时，除了显示被测电路频率特性曲线外，还应当准确指出曲线上任一点所对应的频率值，这个功能是由频率标记发生器所产生的频标信号来完成的。

为了便于测试观察，在示波管屏幕上往往要求显示多种频率的标记，每个间隔以十进位的分度来显示，如 1、2、3、…、10、20、30MHz 等标记，如同标尺一样，可以度量出特性曲线的频率范围和粗读曲线上某点的频率值。

产生频标的方法主要有 4 种：差频法、电压比较法、吸收法及选频法。

扫频信号与基准信号混频后所获得的一系列零差频信号，并经带通或低通放大和整形，

+E_C
VD₁
R₁
C₁
VT₁

由于差频信号频率越高的滤波器的输出幅度越小,因而形成菱形频标。

将扫频瞬时频率表示为一个模拟直流电压,并与扫描信号电压相比较,相等时,比较器输出一个脉冲信号,即相应的频率标记。

若扫频信号通过一个高 Q 值吸收电路后,再加入到被测网络,则当扫频信号频率等于吸收电路的串联谐振频率时,信号被吸收,对应于被测幅频特性曲线该点的频率处出现一个缺口,即为相应的频标。

将扫频信号反馈至一组预置频率的选频放大器的输入端,当扫频信号瞬时频率为某放大器的谐振频率时,放大器有输出,信号经包络检波后得到相应频标,称为选频法。

不管哪种方法产生的频标,都和相应的扫频信号瞬时频率一一对应,而扫频信号的瞬时频率是受扫描信号电压调制的,因此频标和扫描信号电压就有了一一对应的关系。在测量中,显示器的 X 轴是由扫描信号驱动的,并由频标对 X 轴定度,这样, X 轴就由时间轴转换成了频率轴,示波管由时域的测量转换成了频域的测量。

3. 显示部分

显示部分包括扫描信号发生器、垂直放大器和示波管等,具体原理与示波器内部结构类似,见 7.2 节的介绍。

7.4.2 使用方法

常用的扫频仪型号可分为:超低频扫频仪(如 BT-6A 型, $10\text{Hz} \sim 479.7\text{Hz}$)、低频扫频仪(如 BT-4A 型, $20\text{MHz} \sim 2\text{MHz}$)、高频扫频仪(如 BT-5 型, BT-9 型, $0.2\text{MHz} \sim 20\text{MHz}$)、超高频扫频仪(如 BT-3 型、BT-2 型, $1\text{MHz} \sim 300\text{MHz}$)和微波扫频仪(如 XS2 型, $3.7\text{GHz} \sim 11.4\text{GHz}$)等。扫频仪型号众多,但基本方法是相同的。本节介绍应用广泛的 BT-3 型频率特性测试仪,讲述其装置和使用。

扫频仪的面板如图 7-9 所示,控制装置分显示、扫频及频标 3 部分。

1. 显示部分

(1) 电源、辉度旋钮(1)。该控制装置是一个开关电位器,兼电源开关和辉度旋钮两种作用。顺时针旋动此旋钮,即可接通电源,继续顺时针旋动,荧光屏上显示的光点或图形亮度增加,可调至适中。

(2) 聚焦旋钮(2)。用来调节屏幕上光点的细小、圆亮或亮线的清晰度,以保证所显示波形的清晰度。

(3) 坐标亮度旋钮(3)。在屏幕的四角,装有 4 个带颜色的指示灯,使屏幕的坐标尺度线显示明亮。旋钮从中间位置向顺时针方向旋动时,荧光屏上两个对角位置的黄灯亮,屏幕上出现黄色的坐标线;从中间位置逆时针方向旋动时,另两个对角位置的红灯亮,显示出红色的坐标线。黄色坐标线便于观察,红色坐标线则可用于摄影。

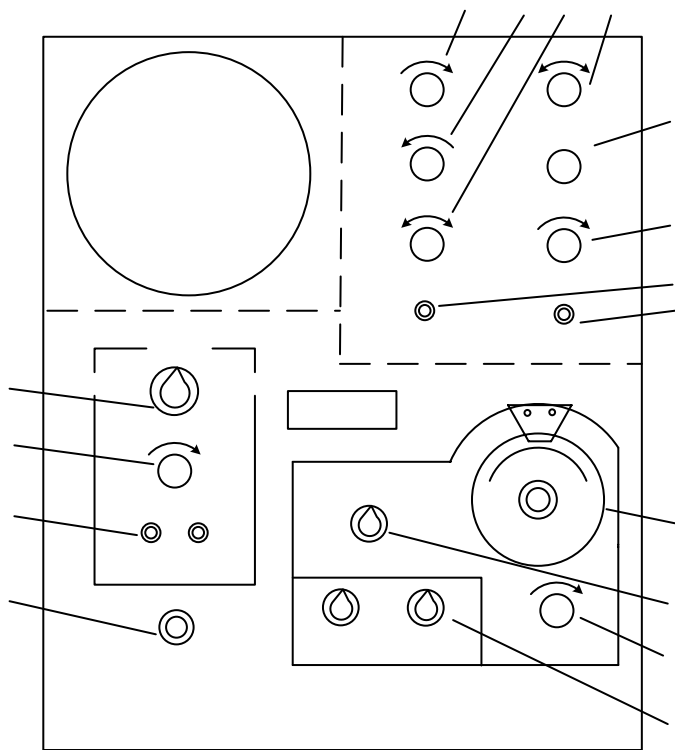


图 7-9 频率特性测试仪面板示意图

- (4) Y 轴位置旋钮 (4)。调节显示在荧光屏上图形垂直方向的位置。
- (5) Y 轴衰减开关 (5)。有 1、10、100 三个挡级，根据输入电压的大小选择合适挡。
- (6) Y 轴增益旋钮 (6)。调节显示在荧光屏上图形垂直方向幅度的大小。
- (7) 影像极向开关 (7)。用来改变屏幕上所显示的曲线波形正负极性。当开关在“+”位置时，波形曲线是正极性波形，向上变化；当开关在“-”位置时，波形曲线是负极性曲线，向下变化。
- (8) Y 轴输入插孔 (8)。由被测电路的输出端用电缆探头引接，使输入信号经垂直放大器后，便可显示出该信号的曲线波形。

2. 扫频部分

(1) 波段开关 (9)。输出的扫频信号有 3 个波段选择，按中心频率划分，第 I 波段 1MHz~75MHz，第 II 波段 75MHz~150MHz，第 III 波段 150MHz~300MHz。根据测试需要选择不同的波段。

(2) 中心频率度盘 (10)。能连续改变中心频率，度盘上标定的中心频率不十分准确，

频标幅度

外接频标输入

扫频电压输出

一般采用边调节度盘边看频标移动的数值来确定中心频率位置。

(3) 输出衰减(dB)开关(11)。根据测试需要,选择扫频信号的输出幅度大小,按开关的衰减量来划分,可分粗调(0、10、20、30、40、50、60)和细调(0、2、3、4、6、8、10)两种。粗调和细调的总衰减量为70dB。

(4) 扫频电压输出插孔(12)。扫频电压由此输出,经电缆探头送到被测电路的输入端以便进行测试。

3. 频标部分

(1) 频标选择开关(13)。有1MHz、10MHz和外接3挡。当开关置于1MHz或10MHz挡,扫描线上显示1MHz或10MHz的菱形频标;置于外接档时,扫描线上显示外接信号频率的频标。

(2) 频标幅度旋钮(14)。调节频标幅度大小,使观测清楚,一般幅度不宜过大。

(3) 频率偏移旋钮(15)。调节扫频信号的频率偏移带宽,以适应被测电路的通频带宽度所需的频偏。顺时针方向时,频偏增宽,最大可达 $\pm 7.5\text{MHz}$ 以上;逆时针则频偏变窄,最小在 $\pm 0.5\text{MHz}$ 以下。

(4) 外接频标输入接线柱(16)。当频标选择开关置于外接频率挡时,外来的标准信号发生器的信号由此接线柱接入,此时在扫描线上显示外频标信号的标记。

测试前经过准备、检查工作,调节好频标、频偏,并将各开关、旋钮参数选择在适当位置,即可观测电路幅频特性等曲线和参数。

7.5 晶体管特性图示仪

晶体管特性图示仪,简称图示仪。它是利用电子扫描的原理,在示波管的荧光屏上直接显示晶体管特性的仪器。它可以直接显示观测器件的输入特性及输出特性曲线,并可读出观察晶体管的各项参数,还可迅速比较两个同类晶体管的特性。图示仪在测试时采用瞬时电压和瞬时电流,能使被测晶体管只承受瞬时过载而不会造成损坏,并且读数方便,因此该仪器广泛应用于与半导体器件相关的各个领域。

7.5.1 工作原理及基本组成

如图7-10(a),当我们在测试三极管的输出特性曲线时,首先需要调节 R_B 电阻,确定 $I_B=I_{B1}$,然后改变电位器 W ,使 U_C 从0逐点变化到 E_C ,记下对应的 I_C 值,便可画出 I_{B1} 时 U_C 、 I_C 曲线。再调节 R_B 电阻,确定 $I_B=I_{B2}$,逐点测试 U_C 及 I_C 的值,画出在 I_{B2} 下的 U_C 、 I_C 曲线。

如此重复,就可画出三极管在不同 I_B 值时的输出特性曲线簇,如图7-10(b)所示。这种方法称作点测法。

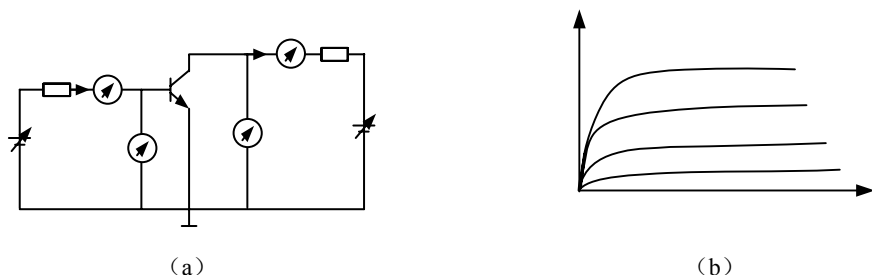


图 7-10 三极管输出特性的测试

显然,这种测试方法速度太慢,而且在测量极限参数时还易损坏晶体管。

我们知道,如果 E_C 值随时间连续变化,那么 U_{CE} 与 I_C 也将按特性随时间变化。如果把变化的 U_{CE} 和 I_C 通过一定线路分别加到示波器水平和垂直输入端,即可在荧光屏上显示出一条输出特性曲线。如果在 E_C 随时间每变化一次后, I_B 自动变化一个数值,则可显示出一簇输出特性曲线。这样就能瞬间将三极管的输出特性曲线簇显示出来。

为了实现上述自动测试,需要提供一周期性按比例变化的基极电流,通常利用阶梯波发生器产生这样的信号来提供变化的基极电流,如图7-11所示,改变阶梯波每个周期的级数,可得到不同的曲线数。

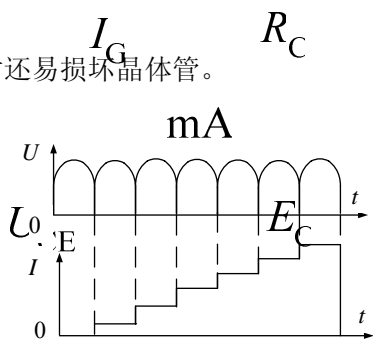


图 7-11 阶梯波的产生

晶体管特性图示仪的基本框图如图7-12所示。

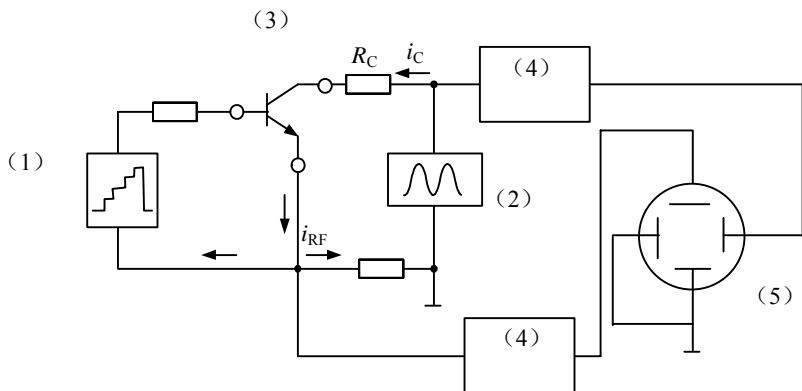


图 7-12 晶体管特性图示仪结构图

图中各部分的作用如下:

- (1) 基极阶梯波发生器。提供大小呈阶梯变化的基极电流。
- (2) 集电极扫描电压发生器。提供集电极扫描电压。一般直接将市电经全波整流后得到的半正弦波电压作为被测晶体管的集电极扫描电压。
- (3) 测试转换开关。用以转换测试不同接法和不同类型的晶体管特性曲线参数, 最常见的有 NPN 和 PNP 管的选择。
- (4) 垂直放大器、水平放大器(或称 Y 轴放大器、X 轴放大器)和示波管组成示波器, 用来显示被测晶体管的特性曲线, 其工作原理与一般示波器一样。
- (5) 按作用在 X 轴、Y 轴上物理量的不同, 示波管显示不同的特性曲线。集电极电压作用 X 轴, 集电极电流作用 Y 轴, 可测量晶体管输出特性曲线; 基极电流作用 X 轴, 集电极电流作用 Y 轴, 可显示电流增益特性; 基极电流作用 Y 轴, 基极电压作用 X 轴, 可显示晶体管输入特性曲线。

7.5.2 使用方法

(1) 使用仪器前, 应先熟悉仪器使用方法和被测晶体管的性能规格、测试条件, 适当调整各开关、旋钮位置, 以免损坏被测管。如被测管参数未知, 加在其上的电流电压要从最小值渐渐加大至符合被测管的测试要求和工作状态要求, 按照规定的顺序操作。

测试完毕后, 要使仪器复位: 峰值电压调至 0V, 功耗电阻调至 1k Ω 以上, 防止下次测试时损坏被测管。

(2) 测试前对被测晶体管的型号及参数有初步了解, 特别是极限参数(最大允许功耗、集电极最大允许电流、反向击穿电压等), 这样对测试时设置开关和旋钮位置会提供很大便利, 并可防止损坏被测器件或仪器内部电路。

(3) 测量三极管的特性参数时, 要区分 NPN 与 PNP 型的极性, 选择相应的集电极电压和基极阶梯信号特性。

(4) 如不知被测管参数时, 从最小量程挡位逐渐升高加在集电极的扫描电压及基极阶梯电流, 功耗电阻从最大逐渐减小, 直至显示特性满足被测管的测试要求或符合需要的工作条件为止。

(5) 测试参数应符合被测管的规定测试条件, 否则测试结果会有偏差。测试条件可参照生产厂家规定的技术条件, 也可根据实际电路的工作状态而定。

7.6 频谱分析仪

用示波器显示信号波形是观测信号的最常用方法。它将时间作为水平轴, 在时间域内

观察信号,也就是做信号的时域分析。如果要观测一个信号所包含的频率成分,用频谱分布图来表示信号的特性,即频域分析或频谱分析,这是示波器不能实现的。比如要求显示出构成非正弦信号频率分量的情况。但是信号的频谱分析能够提供在时域观测中没有的独特信息,所以我们可以使用频谱分析仪来完成。

频谱分析仪可将构成非正弦波信号的基波与各次谐波的频率及幅度显示在荧光屏上,从而得到非正弦波的频谱图,还可用于测量放大器的谐波失真、信号发生器的频谱纯度以及系统的频率特性等。

7.6.1 工作原理

频谱分析仪按照工作原理分为模拟式和数字式两种,前者应用较为广泛,是以模拟滤波器为基础,用于射频和微波频段;数字式频谱仪是以数字滤波器或快速傅立叶变换为基础,用于低频和超低频。

模拟式频谱仪根据工作方法分为并行滤波法、时间压缩法、傅立叶变换法、顺序滤波法、扫频滤波法及扫频外差法,前3种是实时频谱分析,后3种是非实时频谱分析。应用最广泛的是扫频外差式频谱仪,下面重点讨论它的组成和基本工作原理。

如图7-13是扫频外差式频谱仪的原理框图,由外差式接收机和示波器组成,使用扫频振荡器作为外差式接收机的本机振荡器,中频电路有频带很窄的滤波器,按外差方法选择所需的频率分量。

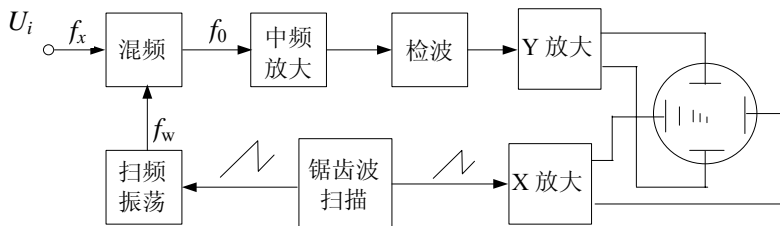


图 7-13 频谱仪原理框图

外差法采用扫频振荡信号与被测信号经混频器差频产生固定中频信号,在扫频时,扫频振荡信号和被测信号顺序差频得到中频,即相当于选取一系列被测信号的频率分量。被测信号在一定频率范围内,有一个频率分量就有一个中频输出,中频信号经检波器解调出各自的振幅,经放大后加到Y偏转板,得到响应频率成分的幅度值,且与对应频率信号的幅度成正比。加到X偏转板的锯齿波扫描电压就是本机振荡器的调制电压,因此坐标横轴变为频率轴,这样荧光屏上就显示出了被测信号的频谱图。

要注意的是,在屏幕上看到的并非是一条条理想的谱线,而是窄带滤波器的幅频特性曲线。因为在利用外差法时,对本机振荡器进行扫频,可看作窄带滤波器的滤波特性曲线

以扫频速度依次扫过各个输入频率分量，但实际上窄带滤波器是有一定通带宽度的，所以最后观测到的谱线实际上是一个个窄带滤波器的动态幅频特性曲线。

频谱仪的实际构成更为复杂，采取了多种改进来得到更佳参数。为获得较高的灵敏度采用多次变频的方法，避免引起振荡，并提高频率分辨率，需在多个中频上增加放大器；采用输入衰减器来扩大量程和提高输入阻抗；采用频标信号以直接读出频率值；接入对数放大器以获得大的动态范围。

7.6.2 主要参数

1. 频谱分辨率

频谱分辨率指频谱仪能够分辨的最小谱线间隔，表征了频谱仪能将频率相邻的信号区分开来的功能。在频谱仪屏幕上显示的被测信号的谱线实际上是一个窄带滤波器的动态幅频特性。因此，分辨率取决于这个幅频特性的带宽，定义幅频特性的 3dB 带宽为频谱仪的分辨率。因为窄带滤波器的幅频特性曲线形状与扫频速度有关，因此分辨率也与扫频速度有关。静态幅频特性曲线，即当扫频速度为零时的 3dB 带宽称为静态分辨率；扫频速度不为零时，工作动态幅频特性曲线的 3dB 带宽称为动态分辨率。一般静态分辨率由仪器说明书中给出，动态分辨率则与使用条件有关（速度越快，动态分辨率就越低）。

2. 扫频宽度

扫频宽度又称分析谱宽，表示频谱仪在一次测量分析过程中（即一个扫描正程）显示的频率范围。为便于观测被测信号频谱的全貌，需要较宽的扫频宽度，如全景频谱仪，为了便于分析频谱图中的细节，需要窄带扫频。现代频谱仪的扫频宽度都是做成可调的。

3. 分析时间

分析时间指每完成一次频谱分析所需要的时间。实际上就是扫描的正程时间，即本机振荡器频率扫描一个完整扫频宽度所需要的时间。扫频宽度与分析时间之比称为扫频速度。

4. 动态范围

动态范围表征同时显示大信号与小信号的真实频谱的能力，其上限由频谱仪的非线性失真决定，一般在 60dB~90dB。为适应不同测量的需要，频谱仪的幅值显示方式有两种，线性的和对数的，后者可在有限的屏幕有效高度范围内获得大的动态范围。

5. 灵敏度

灵敏度表征频谱仪测量微小信号的能力。显示幅度为满刻度时输入信号的电平值，定

义为频谱仪的灵敏度。扫频工作时,该值与扫频速度有关,扫频速度加快,动态幅频特性峰值降低,使得灵敏度下降,并产生幅值误差。

在频谱仪上扫频宽度、分析时间、带宽都是可调的,根据被测信号频谱的特点,选择合适的参数范围,得到精确的测量结果。

7.7 小 结

本章介绍了时域和频域测量的基本方法以及常用的测量仪器,主要有示波器、频率特性测试仪、晶体管特性图示仪及频谱分析仪,后几类仪器可看作在示波器基础上的扩展应用。要求通过学习本章掌握以上仪器的基本组成与原理,了解其使用方法。

7.8 思 考 题

1. 通过示波器可以测试哪些信号参数?
2. 示波器的主要技术指标有哪些,各表示何种含义?
3. 扫频仪、频谱仪的用途是什么,怎么正确使用,应注意什么问题?
4. 示波器与频谱仪的区别是什么?
5. 晶体管特性图示仪的组成有哪些?

第 8 章 逻辑电路的测量与仪器

8.1 概 述

进入 21 世纪以来,随着计算机和微电子技术的迅猛发展,微处理器和 LSI、VLSI 得到了广泛应用。如在通信系统中,应用数字电子技术的数字通信系统,不仅比模拟通信系统抗干扰能力强、保密性好,而且还能应用电子计算机进行信息处理和控制,形成以计算机为中心的自动交换网。逻辑电路的测量手段及所运用的仪器与传统电子测量的方法和仪器有很大的区别。

在测量仪表中,逻辑电路测量仪表不仅比模拟测量仪表精度高、测试功能强,而且还易实现测试的智能化和自动化。为了解决逻辑电路中数字设备、计算机及 LSI、VLSI 电路在研制、生产和检修中的测试问题,一种新的测试技术便应运而生。由于被测系统的信息载体主要是二进制数据流,为了区别时域和频域的测量,常把这一类测试技术称为数据域测试技术。

8.1.1 数据域测试技术

数据域测试与传统的时域测试、频域测试方法不同,它是针对逻辑电路的数字系统和计算机系统中“数据”信息的特征来进行测试的。

数据域测试的对象是数字系统,包括芯片、印制电路板、设备乃至系统。与传统测试相比,数据域测试有许多特点:

(1) 被测信号持续时间短,数字信号为脉冲信号,它们在时间和数值上是不连续的,它们的变化总是发生在一系列离散的瞬间。

(2) 被测信号故障定位难,数字信号只有 0、1 两种数值,要表示一个字符或一组信息,必须由若干位 0、1 按一定的编码规则组成,而这多位数据要同时传递,需多根导线,即采用线传递。

(3) 被测信号的非周期性。在执行一个程序时,许多信号只出现一次,有些信号虽然重复发生,但却是非周期性的,如子程序的调用等。对于这些信号,用示波器观测出的仅是一些音量杂乱的波形,难以进行分析。在数字系统中,许多器件都挂在同一条总线上。因此当发生故障时,用一般方法进行故障定位比较困难。因为信号的前沿很陡,频谱分量

十分丰富,要观察清楚,需注意信号在电路中的建立和保持时间。

目前,数据域测试与传统的时域测试、频域测试已成为电子测量技术进行测试的3个重要的领域。逻辑电路和系统所处理的信息是用离散的二进制信息来表示的,多个二进制的组合构成了一个数据。在逻辑电路系统中对其数据信息的测试就称为数据域测试。与传统的时域测试、频域测试方法不同,数据域测试有许多特点:

(1) 数字信息几乎都是多位传输的,许多数据仅发生一次,有些信号虽然重复出现,但却是非周期的。

(2) 数据流往往很长而其中可能只有一位出错、不易辨认。

(3) 速度变化的范围很大等。

所有这些都对数据域测试提出了新的要求,也促进了数据域测试的发展。据估计目前数字系统的测试费用约占研制、生产总费用的30%~40%。随着数字系统复杂程度的增加,这个比例还要增加。近年来,迅速发展了一门数字系统设计的新技术,这就是数字系统的可测性技术,即按可测和易测的原则设计数字系统。这样的数字系统能够很方便地测试,但缺点是仍需在数字系统外部测试,仍需昂贵的测试系统。

为了从根本上解决数字系统的测试问题,目前发展了一种数字系统自测技术,即系统内部自己产生激励,自己评价响应并给出“合格/失效”的结果,是系统自己测试自己的技术。

8.1.2 逻辑电路测试系统

逻辑电路测试系统的原理框图如图8-1所示,由数字信号发生器、被测逻辑电路和逻辑分析仪组成。

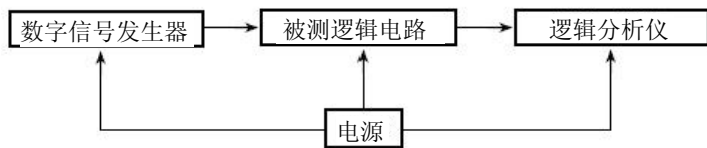


图 8-1 逻辑电路测试系统原理框图

一个被测系统可以用它的输入和输出特性及时序关系来描述,其输入特性可用数字信号发生器产生多通道时序信号来激励,而它的输出特性可用逻辑分析仪来测试获得对应通道的时序响应,从而得到被测数字系统的特性。

1. 数字信号发生器

数字信号发生器也叫数据发生器,它是数据域测试中一种重要测试仪器。它用来模拟数字系统功能测试和参数测试的输入激励信号。它可产生数据图形和数据图形宽度均可编

程的并行和串行数据，在选通信号和时钟信号的控制下，产生输出电平和数据速率可编程的任意波形，以及一个预先规定的数据流。数字信号发生器可以模拟数字系统中各种测试信号，对提高工程测试处理能力，缩短系统的集成时间及加快产品的设计周期有重要的意义。

数字信号发生器由主机和多个模块组成，而每个模块又具有多个数据通道，如图 8-2 所示。主机包括中央处理单元、电源、信号处理单元（时钟和启动/停止信号发生器）和人机接口；模块包含序列和数据产生部件，以及通道放大器。一个模块可以具有多个数据通道单元，并可根据用户需要来扩展其通道数，各通道的结构是完全相同的。

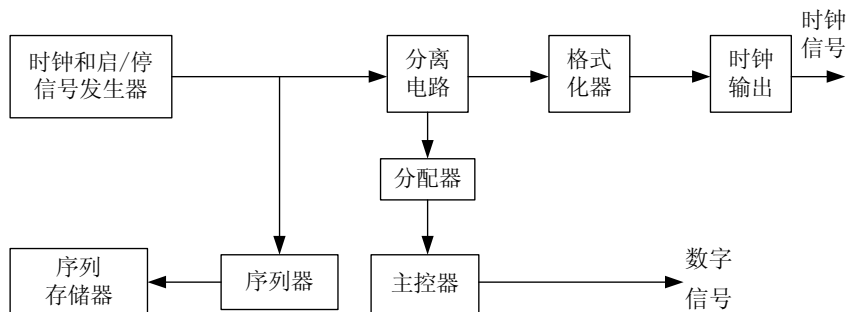


图 8-2 数字信号发生器的原理框图

内部标准时钟源由压控振荡器（VCO）控制的中央时钟发生器组成，在高性能的数字发生器中还使用锁相环，以保证高的稳定性和精确的时间周期。许多数字信号发生器还提供一个外部时钟输入端，以使用被测系统的时钟来驱动时钟发生器。

分离电路可提供 10 个不同的时钟输出，这 10 个时钟分别送到各数据模块时钟输入端。信号处理单元提供一个启/停信号，并将它们并行加到各时钟上。该信号使数字信号发生器同步启动或停止各模块的工作。

存储器是产生数据的核心，它在初始化期间就为每个通道写入了数据。数据存储器的地址是用简单的计数器产生的，数据与地址一一对应。数据存储器按每字 8 位来组织，即每个地址输出一个 8 位的数据。

一个 8:1 的多路器将运行频率为 $F/8$ 的 8 个并行输入位转换成频率为 F 的串行数据流。格式化工器是一个将时钟加到数据流的器件，最简单的情况下格式化工器就是一个 D 触发器。格式化工器的输出直接驱动输出放大器，该放大器的输出电平是可编程的。在某些数字信号发生器中，数据流传输的时间也是可以编程的，并在每个数据模块上提供外部时钟和启/停输入端。具有这些特性就可产生不同的异步数据流。

2. 数字信号发生器的主要技术指标

(1) 通道数。数字信号发生器的通道数是描述测试能力的一个重要技术指标。通道数

愈多, 同时进行测试的数据位数就愈多。通常数字信号发生器都采用模块式结构, 每个模块有4~16个通道, 可用简单的增加模块的方法来增加通道数。

(2) 最大数据速率。数字信号发生器的最大数据速率表示可产生数据的最高速率。它可以在一定范围内变化, 以适应被测系统测试速率的要求。通用的数字信号发生器的数据速率大都在100Mbps左右。

(3) 存储深度。存储器的存储深度是表征数字信号发生器存储数据位的大小。在大多数的应用中只需要数百至数千位的数据存储深度, 如果需要更大的存储深度, 可以用多种方法来增加虚拟的存储深度。

(4) 输出放大器。高速数字信号发生器的每个通道都具有一个50 Ω 源阻抗的放大器。因此, 它适用于高速50 Ω 环境。某些数字信号发生器还提供不同输出的放大器, 即同时提供正常的数据和反向的数据输出。大多数数字信号发生器都提供具有独立可编程为高电平或低电平的放大器, 使逻辑电平适合于被测系统的需要。某些数字信号发生器还提供可变的上升时间, 以满足某些特殊场合测试的需要。

(5) 偏移。偏移是相对于数字信号发生器内部参考时钟在不同的通道中传输时产生延时的差异, 也就是每个数据位经不同通道同时到达被测系统的程度。在调整了每个通道的延时偏移后, 数字信号发生器所有通道的传输延时值均应相等。

(6) 抖动。抖动的定义是在一个时钟信号或数据流中, 数据位边沿位置的不确定性。对于时钟信号, 抖动是以一个时钟周期为单位来测量和规定的。用正时钟沿触发示波器可以测量周期抖动, 并显示同一信号的下一个正沿。

(7) 触发能力。大部分数字信号发生器都具有用外部信号来启动或停止数据流的能力, 而某些低速的数字信号发生器还提供一个触发器端, 以产生一个启动/停止信号。某些数字信号发生器可提供简单的附加的启动/停止功能, 即选通功能。数字信号发生器有时还为每一个数据模块提供一个触发输入端, 并为各模块提供独立的时钟, 以便产生异步的数据流。

(8) 用户接口。当数字信号发生器用于通道数非常多的情况时, 必须有一个好的数据编辑器, 这样才能处理大量的数据。在高档的数字信号发生器中, 还提供波形并行编辑器, 用户利用这个编辑器就可使用数字系统的定时图来建立数据。

8.2 简单的逻辑分析方法

对于一般的逻辑电路, 如分立元件、中小规模集成电路及数字系统的部件, 可以利用示波器、逻辑笔、逻辑比较器和逻辑脉冲发生器等简单而廉价的数据域测试仪器进行测试。常见的简易逻辑电平测试设备有逻辑笔和逻辑夹, 它们主要用来判断信号的稳定电平、单

个脉冲或低速脉冲序列。其中逻辑笔用于测试单路信号，逻辑夹用于测试多路信号，逻辑夹一般在大型逻辑电路中使用。

8.2.1 逻辑笔的基本组成

逻辑笔的基本组成框图如图 8-3 所示。被测信号经过输入保护电路后同时加到高、低电平比较器，比较结果分别加到高、低脉冲展宽电路，以保证测量单个的窄脉冲时有足够时间点亮指示灯。展宽电路的另一个作用是通过高、低电平展宽电路的相互影响，使电平测试电路在一段时间内产生一种确定的电平，从而只有一种颜色的指示灯亮。保护电路用来防止输入信号过大时损坏检测电路。

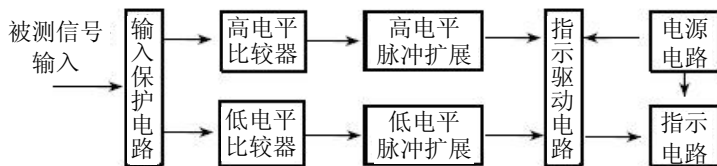


图 8-3 逻辑笔的组成原理框图

8.2.2 逻辑笔的应用

逻辑笔用于判断某一端点的逻辑状态。逻辑笔有两个指示灯，红灯指示逻辑“1”（高电平），绿灯指示逻辑“0”（低电平）。逻辑笔具有记忆功能，如测试点为高电平时，红灯亮，此时，即使将逻辑笔离开测试点，该灯仍继续亮，以便记录被测状态。当不需记录此状态时，可扳动逻辑笔的复位开关使其复位。逻辑笔的测试响应如表 8-1 所示。

表 8-1 逻辑笔的测试响应

序 号	被测点的逻辑状态	逻辑笔的响应
1	稳定的逻辑“1”状态	红灯稳定亮
2	稳定的逻辑“0”状态	绿灯稳定亮
3	逻辑“1”与逻辑“0”的中间状态	两灯均不亮
4	单次的正脉冲	绿—红—绿
5	单次的负脉冲	红—绿—红
6	低频率序列脉冲	红绿灯交替闪烁

逻辑笔还可应用在选通的正、负脉冲，逻辑笔在选通脉冲的控制下做出响应。如用负选通脉冲控制逻辑笔的输出，虽然被测信号是稳定的逻辑“1”状态，在选通脉冲到来前，红灯不亮；只有选通脉冲到来后，逻辑笔才工作，此时红灯有指示。

8.3 逻辑分析仪

逻辑分析仪主要用于数字电路的开发、前期分析和设计工作，以及错误与故障的分析诊断。该仪器是数据域测试中使用最广泛的一种仪器。示波器的基本功能是捕获并显示被测信号的波形，而逻辑分析仪的基本功能是采集、存储并以多种方式显示数字系统中的数据流，即在采集时钟有效沿瞬间的被测电路节点的二进制状态值。随着数字系统复杂程度的增加，尤其是微处理器的高速发展，采用简单的逻辑电平设备测试已经不能满足测试要求了。逻辑分析仪对数据有很强的选择能力和跟踪能力，能满足数字域测试的各种要求，成为数字系统进行逻辑分析的重要工具。

8.3.1 逻辑分析仪的主要特点

逻辑分析仪的主要特点如下：

- (1) 以荧光屏显示的方式表示数字系统的运行情况，便于观察。
- (2) 有足够多的输入通道，可同时检查 32 路、64 路甚至更多路信号。
- (3) 具有多种灵活的触发方式，确保对被观察数据流的准确定位。
- (4) 具有记忆功能，可以观测单次及非周期性数据信息，并可诊断随机故障。
- (5) 具有限定功能，可对数据进行挑选，删除无关数据。
- (6) 具有多种显示方式，如可用字符、助记符、汇编语言显示程序；用二进制、八进制、十进制、ASCII 码等显示数据；用定时图显示信息之间的时序。
- (7) 具有可靠的毛刺检测功能。

8.3.2 逻辑分析仪的分类

逻辑分析仪按其工作特点，可分为逻辑状态分析仪和逻辑定时分析仪两大类。这两类分析仪的基本结构是相同的，两者的主要区别在于显示方式和定时方式不同。

逻辑状态分析仪主要用于检测数字系统的工作程序。并用字符“0”和“1”、助记符或映射图等来显示被测信号的逻辑状态，以便对系统进行状态分析。其状态数据的采集是在被测系统的时钟控制下实现的，即逻辑状态分析仪与被测系统是同步工作的。这能有效地解决系统的动态调试问题。因此，逻辑状态分析仪主要用于系统的软件测试。

逻辑定时分析仪用定时图方式显示状态信息，与示波器显示方式类似，即水平轴代表时间，垂直轴代表电压幅度。它可显示各通道的逻辑波形，特别是各通道之间波形的时序关系。为了能显示出这种时序关系，在逻辑定时分析仪中提供取样时钟，即所谓的内时钟来控制数据的采集。通常用于采集数据的内时钟频率应为被测系统时钟频率的 5~10 倍。因此，逻辑定时分析仪与被测系统是异步工作的，主要用于数字系统的硬件测试。

8.3.3 逻辑分析仪的基本组成

逻辑分析仪的基本组成如图 8-4 所示。逻辑分析仪主要由数据捕获和数据处理与显示两部分组成。数据捕获部分用来快速捕获并存储待观察的数据，首先将各通道的输入变换成相应的数据流，当搜索到特定的数据字时，就产生触发信号去控制数据存储器开始存储有效数据或停止存储数据。数据处理显示部分则将存储在存储器里的有效数据进行处理，并以多种显示方式显示出来，以便对捕获的数据进行分析。

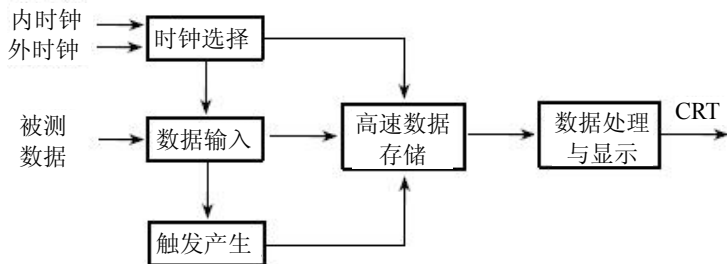


图 8-4 逻辑分析仪的原理框图

8.3.4 逻辑分析仪的基本工作原理

1. 数据的捕获

数据由彩色编码的探头（一般称为通用探头）向被测试的数字系统进行采集，从数据探头得到的信号经电平转换延迟变为 TTL 电平之后，在取样脉冲的作用下，经取样电路存入高速存储器中。这种将被测信号进行取样并存入存储器的过程称为数据的捕获。数据捕获的方式一般有两种，具体介绍如下：

（1）取样方式。所谓取样方式，就是在取样脉冲到来时，对探头中比较器输出的逻辑电平进行判断，若比较器输出高电平取样电路就将逻辑“1”送到存储器中；若比较器输出低电平，则取样电路将逻辑“0”送到存储器中。取样电路的输出在取样时钟脉冲到来时才变化。

（2）锁定方式。锁定方式是用来捕捉出现在两个取样脉冲之间的毛刺，毛刺往往是逻辑电路发生误动作的主要原因。

2. 触发

跟踪一个运行着的数字系统所提供时，数据流非常大，甚至是无穷无尽的，而存储数据的存储器容量和显示数据的屏幕尺寸总是有限的。因此，要一个不漏地一次存储或显示它们是不可能的。为了对数据流进行存储和分析，提高高速存储器的利用率，应该将数据

流分成若干段落,并分段有选择地采集数据。只对感兴趣的数据进行捕捉和显示,这一点可通过对逻辑分析仪进行点触发来实现。用于触发的数据字常称为触发字,设置触发字的目的在于选择所需要的数据流。为了有效地捕捉数据流,逻辑分析仪一般都配置有多种触发功能,即用不同的方法产生触发信号。

(1) 基本触发。基本触发也称为字组合触发,即将逻辑分析仪各通道的信号和各级通道预置的触发字进行比较,当一一对应的各位相同时,则产生触发信号。基本触发又分为起始触发和终止触发两种。起始触发是所显示数据流中的第一个数据;终止触发是所显示数据流的最后一个数据。这样,逻辑分析仪可以很方便地从复杂的数据流中选出需要的数据段进行观察和分析。

(2) 触发功能的扩展。由于现代数字系统功能的不断扩展,其数据流越来越复杂。这就为数据段的选择带来一定的困难。为此需要扩展逻辑分析仪的触发功能,使它能够在测量中对复杂的数据流进行分段捕捉、存储、分析。现代逻辑分析仪扩展的功能很多,主要有限定触发、延迟触发、序列触发等。

8.3.5 数据流的存储

在现代数字系统的数据流测试中,必须对满足触发条件的有效数据进行存储,以便分析时使用。存储的方式主要有以下两种。

1. 基本存储方式

基本存储方式是将数据流用只读存储器(ROM)存储。这时数据的存储采用顺序存储方式,即数据的写入和读出都是顺序进行的。存储器通常采用“先入先出”的存储器,当存储器存满数据后继续写入数据时,先存入的数据首先溢出,这个过程一直延续到数据存储停止。

2. 选择性存储(时钟限定)

为了有效地利用有限的存储单元,往往仅选择数据流中某一部分进行存储。因此,附加一个时钟限定条件,由它来决定取样时钟的有效和无效,就可以实现数据的选择性存储。综上所述,逻辑分析仪数据捕捉过程可用图 8-5 来说明。

首先根据被测对象确定逻辑分析仪数据的捕捉方式,根据需要进行选择取样方式或锁定方式;其次是捕捉有效数据,即触发条件和触发方式的设置,若被测试数据满足了设置的触发条件,则产生触发信号并启动存储器控制电路。最后,在写时钟的作用下将有效数据存入存储器,等待处理和显示。

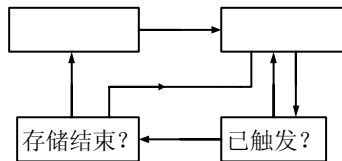


图 8-5 数据捕捉过程

8.3.6 时钟

为了保证逻辑分析仪捕捉数据的准确性和可靠性，必须注意取样脉冲与被测数据的时间关系。时钟信号可以是异步的（外部产生）或同步的（内部电路本身产生的）。前者用于时序分析，可以提供很高的分辨率，后者用于状态分析。与数据采集有关的两个时钟参数是建立时间和保持时间。

（1）建立时间。数据在时钟的上升沿或下降沿被采集，在时钟跳变之前，数据必须出现在存储器输入端的最短时间称为建立时间，通常为若干纳秒。

（2）保持时间。为使数据可以稳定地存入存储器中，在时钟沿跳变之后数据应保持足够长的时间，保持时间就是在时钟跳变之后，数据必须保持的最短时间。

8.3.7 逻辑分析仪的显示方式

逻辑分析仪的显示方式有伪波形定时显示、状态表显示和反汇编显示 3 种，具体介绍如下。

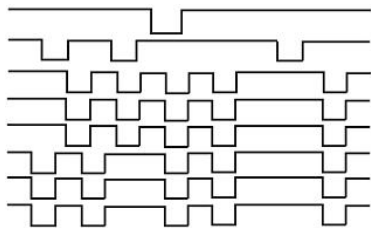


图 8-6 伪波形定时显示

（1）伪波形定时显示。如图 8-6 所示，伪波形定时显示是逻辑分析仪的最基本显示方式，一般来说伪波形显示适用于硬件测试，它可以显示多个观察点之间的逻辑定时关系。伪波形定时显示方式显示出的波形不是被测数据的真实波形，而是一种伪波形。它只是将数据电平的高低用逻辑“1”和“0”来表示，因而这种伪波形定时显示图只显示信息的状态。

（2）状态表显示。状态表显示用真值表、字符或图形把存储器中的数据显示出来，状态表显示适用于软件测试，它可观察软件执行过程中数据变化的情况，如表 8-2 所示。

表 8-2 状态表显示

地址 (HEX)	数据 (HEX)	状态 (BIN)
2850	34	11010
2851	7F	01011
2852	9D	11000
2853	AC	00111
⋮	⋮	⋮

（3）反汇编显示。反汇编显示是将软件运行时所捕捉到的数据反汇编成对应微处理器的汇编语言来进行显示。反汇编显示适用于微机系统的测试和故障分析，如表 8-3 显示。

表 8-3 反汇编显示

地址 (HEX)	数据 (HEX)	操 作	操作数 (HEX)
2000	214200	LD	HL, 2042H
2003	0604	LD	B, 04H
2005	97	SUB	A
2006	23	INC	HL
⋮	⋮	⋮	⋮

8.3.8 逻辑分析仪的主要技术指标

本节主要逻辑分析仪的主要技术指标。

(1) 测试速率。逻辑分析仪的测试速率应大于被测系统的工作速率，以便可靠地捕捉被测系统的数据。目前逻辑分析仪的定时分析速率一般为 100MHz~500MHz；状态分析速率一般为 35MHz~100MHz。

(2) 数据通道。为了同时观测数字系统的多路信息，逻辑分析仪应具有足够多的数据通道。通道越多所能观测到的数据信息量就越大。目前逻辑分析仪数据通道一般在 64~102 之间。

(3) 触发方式。逻辑分析仪具有多种灵活而准确的触发能力，可在任意长的数据流中，对欲观察分析的部分数据段做出准确的定位，从而捕捉有效数据。一般逻辑分析仪具有近 10 种触发方式。

(4) 存储深度。存储器的存储深度决定采集数据的多少，存储深度越大，采集的数据就越多，更有利于对软硬件工作的分析。逻辑分析仪的存储深度一般在 4KB~1MB 之间。

8.3.9 逻辑分析仪与传统示波器的比较

逻辑分析仪和示波器都是常用的时域测试工具，但它们的测试对象、测试方法、显示方法及触发方式等都不同，如表 8-4 所示。

表 8-4 逻辑分析仪与普通示波器的比较

比 较 内 容	逻辑分析仪	普通示波器
主要应用领域	数字系统的软、硬件测试	模拟系统的信号显示
检测的方法和范围	利用时钟脉冲采样	显示触发后扫描时间设定
	显示范围与采样时钟周期和存储容量有关	范围内的波形
	可显示触发前后的状态	
输入通道	容易实现多通道，一般都多于 16 通道	常用的多为两通道

(续表)

比 较 内 容	逻辑分析仪	普通示波器
触发方式	数字方式触发	模拟方式触发
	可根据多通道的逻辑进行组合触发	根据特定的输入条件(电平或信号沿)进行触发
	可与系统运行同步触发	
	可用随机的窄脉冲进行触发	
	可进行多级序列触发	
	可实现超长存储,可存储长时间、高速度的信号	
显示方式	数据实时采集到存储器,可采用状态表、定时图、图解或影射图等多种方式显示,也可按系统运行方式显示测试结果	实时显示波形图

8.4 小 结

本章介绍了数据域测试技术和逻辑电路测试系统;介绍了简单的逻辑分析方法及逻辑笔的基本组成和应用;主要介绍了逻辑分析仪的主要特点、分类、基本组成、基本工作原理、显示方式、主要技术指标以及逻辑分析仪与传统示波器的比较。

要求大家通过对本章的学习了解数据域测试技术和逻辑电路测试系统,掌握简单的逻辑分析方法和逻辑笔的应用;掌握逻辑分析仪的主要特点、工作原理以及主要技术指标;掌握逻辑分析仪的正确使用。

8.5 思 考 题

1. 什么是数字域测试,数字信号发生器的作用是什么?
2. 逻辑分析仪的功能与示波器有什么不同?
3. 逻辑分析仪有哪些触发方式?
4. 逻辑分析仪有哪些显示方式?
5. 逻辑分析仪主要应用在哪些方面?

第 9 章 智能仪器与自动测试系统

9.1 概 述

电子仪器是电子工业的基础，对于国防、科研和国计民生起着非常重要的作用。第二次世界大战后，电子仪器的研制和生产成为一个独立的行业，电子测量与仪器在电子领域也成为一门独立的学科。在 20 世纪 70 年代以前，电子仪器主要依靠电子技术和电子测量技术的发展而发展，如数字技术、锁相技术、频率合成技术、取样技术及 YIG（宽带电调谐）技术的出现，不断提高了电子测量仪器水平，并产生了一些新仪器。最有代表性的如频谱分析仪和频谱合成器等。

随着微电子技术、电脑技术、软件技术的普及应用，出现了以微处理为基础的智能仪器。它具有键盘操作、记忆、存储、数字运算、逻辑判断和命令识别等功能，可实现自动测试，如智能化电子计数器。智能化仪器在测试系统中解决了通用接口的标准化问题，利用 GPIB 通用接口总线将一台计算机和若干台电子仪器连接起来组成自动测试系统，使电子测量原理与方法、仪器设计、仪器性能和功能、仪器使用和故障诊断方面都产生了巨大的变化。

20 世纪 60 年代以前的自动测试系统是没有计算机的，主要由定时及控制器来完成数据采集，此时的计算机系统大都是为某种测试目的而专门设计制造的专用系统，难以改作它用。20 世纪 60 年代以后采用了计算机，才构成比较完善的自动测试系统。到了 20 世纪 70 年代，由于 GPIB 总线和微处理器的普及应用，自动测试系统开始采取组合式或积木式的组建概念，即不同厂家生产的各种型号的通用仪器，加上一台现成的计算机，用一条统一的无源标准总线连接起来。这种积木概念简化了自动测试系统的组建工作，无须在接口硬件方面再做任何工作，大大方便了自动测试系统的组建。因而得到了广泛应用，它标志着测量仪器从独立的手工操作单台仪器走向程控多台仪器的自动测试系统。

20 世纪 80 年代初期，又出现了以个人计算机为基础，用仪器电路板和扩展箱与个人计算机内部总线相连的个人仪器。1986 年美国国家仪器公司以 LabVIEW 为软件开发平台实现了虚拟仪器的概念。虚拟仪器的出现和兴起是电子测量仪器领域的一场重要变革。它提出了一种与传统电子测量仪器完全不同的概念，改变了传统仪器的概念、模式和结构。网络通过释放系统的潜力，也完全改变了测量技术的以往面貌，打破了在同一地点进行采集、分析和显示的传统模式。依靠 Internet 和网络技术，将能够有效地控制远程仪器设备，

在任何地方进行采集、分析并显示。不久的将来，越来越多的测试和测量仪器将融入 Internet。它标志着自动测试系统与电子测量仪器领域技术发展的又一个崭新的方向。

9.2 智能仪器

9.2.1 智能仪器的概念

智能仪器是将人工智能的理论、方法和技术应用于仪器，使其具有类似人的智能特性或功能的仪器。为了实现这种特性或功能，智能仪器中一般都使用嵌入微处理器的系统芯片（SOC）或数字信号处理器（DSP）及专用电路（ASIC），仪器内部带有处理能力很强的智能软件。智能仪器仪表已不再是简单的硬件实体，而是将硬件、软件有机地结合在一起。软件在仪器智能高低方面起重要的作用。仪器与微处理器相结合，取代了许多笨重的硬件，内部结构和仪器面板大为改观，节省了许多开关和调节旋钮。微处理器通过键盘或遥控接口接受命令和信号，并用来控制仪器的运行，执行常规测量，对数据进行智能分析和处理，数字显示或传送，而这些都是传统的模拟方法很难做到的。

9.2.2 智能仪器的特点

与传统仪器仪表相比，智能仪器具有以下功能特点。

（1）操作自动化。仪器的整个测量过程如键盘扫描、量程选择、开关启动闭合、数据采集、传输与处理以及显示打印等都由单片机或微控制器来控制操作，实现测量过程的全自动化。

（2）具有自测功能，包括自动调零、自动故障诊断与状态检验、自动校准及量程自动转换等。智能仪器能自动检测出故障的部位甚至故障的原因，同时，提出解决故障的方法。这种自测试可以在仪器启动时运行，也可在仪器工作中运行，极大地方便了对仪器的维护。

（3）具有数据处理功能，这是智能仪器的主要优点之一。智能仪器由于采用了单片机或微控制器，使得许多原来用硬件逻辑难以解决或根本无法解决的问题，现在可以用软件非常灵活地加以解决。例如，传统的数字万用表只能测量电阻、交直流电压及电流等，而智能型的数字万用表不仅能进行上述测量，而且还具有对测量结果进行诸如零点平移、取平均值、求极值及统计分析等复杂的数据处理功能，不仅使用户从繁重的数据处理中解放出来，也有效地提高了仪器的测量精度。

（4）具有友好的人机对话能力。智能仪器使用键盘代替传统仪器中的切换开关，操作人员只需通过键盘输入命令，就能实现某种测量功能。与此同时，智能仪器还通过显示屏将仪器的运行情况、工作状态以及对测量数据的处理结果及时告诉操作人员，使仪器的操作更加方便直观。

(5) 具有自补偿自适应功能。智能仪器能适应外界的变化, 比如, 能自动补偿环境温度、压力等对被测量的影响, 能补偿输入的非线性, 并根据外部负载的变化自动输出与其匹配的信号等。

(6) 具有可编程操作能力。一般智能仪器都配有 GPIB、RS232C、RS485 等标准的通信接口, 可以很方便地与 PC 机和其他仪器一起组成用户所需要的多种功能的自动测量系统, 来完成更加复杂的测试任务。

9.2.3 智能仪器的基本组成

1. 智能仪器的硬件组成

智能仪器的基本组成如图 9-1 所示, 它有点类似于计算机结构, 与一般计算机结构的差别在于它多了一个“专用的外围设备”——测试电路, 还有它与外界的通讯一般都通过 GPIB 接口系统进行。由于智能仪器具有计算机结构, 因此它的工作方式和计算机一样, 而传统的测量仪器差别较大。微处理器是整个智能仪器的核心, 程序是仪器的“灵魂”。

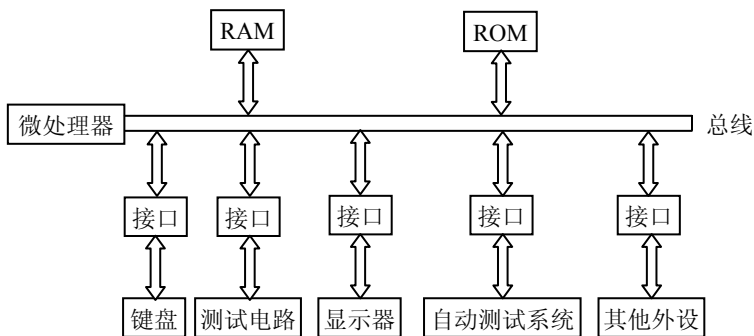


图 9-1 智能仪器组成框图

微处理器接受键盘或 GPIB 接口的命令, 解释并执行这些命令, 如发出一个控制信号给某一个电路, 或者进行某种数据处理等。“测试电路”是微处理器专用的外围设备, 在硬件上它们必然有某些形式的接口, 如简单的三态门, 译码器, A/D、D/A 转换器到程控接口。微处理器通过接口发出各种控制信息给测试电路, 以规定功能、启动测量、改变工作方式等。微处理器通过查询测试电路向微处理器提出中断请求, 使微处理器及时了解测试电路的工作状况。当测试电路完成一次测量后, 微处理器读取测量数据, 进行必要的加工、计算及变换等处理, 最后以各种方式输出。如送到显示器显示、打印机打印或送给系统的主控制器等。

2. 智能仪器的软件组成

智能仪器的测量工作是在软件的控制下进行的, 没有软件, 智能仪器就无法工作, 软件是智能仪器自动化程度和智能化程度的主要标志。智能仪器的软件包括系统软件、应用软件和书面文件。系统软件是微机系统的语言加工程序和管理程序等; 应用软件是指解决用户实际问题的程序, 包括测试程序、数据处理程序、键盘判别程序和显示程序等; 书面文件是帮助用户使用仪器的文件, 包括软件总框图、程序清单、使用说明以及修改方法等。

9.2.4 智能仪器的一般测量过程

智能仪器的工作是由硬件和软件按一定的顺序共同完成的。下面以智能多用表为例说明测量的一般步骤。智能多用表可测量交直流电压、电流和电阻, 其测量功能的框图如图 9-2 所示。信号输入通道分别输入 V_{DC} 、 V_{AC} 、 I_{AC} 、 I_{DC} 、 Ω 等信号。

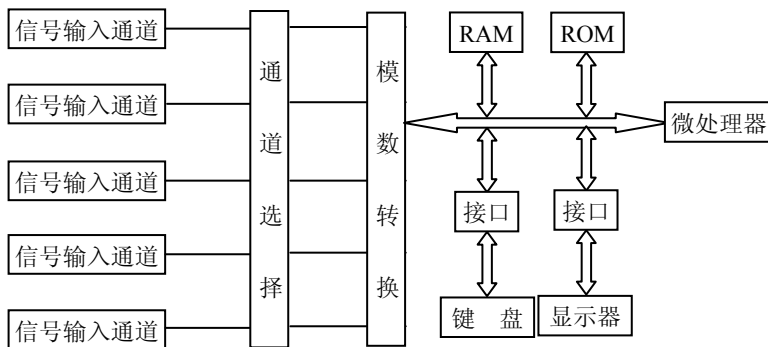


图 9-2 智能多用表的测量功能框图

键盘是仪器工作时的人机接口, 包括功能选择键、复位键、量程选择键、连续测量和单次测量选择键、自检键等。显示电路用于显示各操作键的内容和测量的结果数据, 同时也是人机交流的主界面。其工作过程如下:

- (1) 仔细阅读仪器的使用说明, 明确测试内容。
- (2) 通过键盘或遥控接口选择测试功能, 如选择测量参数或量程等。
- (3) 把被测信号送入测试电路的输入端口。
- (4) 选择“单次”或“连续”方式, 运行程序。若为单次, 则一个程序运行完后结束测试; 若为连续, 则反复进行测量, 直到人为干预后才结束。
- (5) 对测量结果进行数据处理后, 送到显示器显示, 或经 GPIB 总线发送到远地。

9.3 自动测试系统

9.3.1 组建自动测试系统的原则

早期的自动测试系统多为专用系统，往往是针对某项具体测试任务而设计的，通常也被称为第一代自动测试系统。它主要用于重复工作量大、可靠性要求高、测试速度要求快的系统以及测试人员难于停留的场合等。常见的第一代自动测试系统主要有数据自动采集系统、产品自动检验系统、自动分析及自动检测系统等。这些自动测试系统至今仍然在使用，它们能完成大量的、复杂的测试任务，承担繁重的数据分析、信息处理工作，快速、准确地给出测试结果，在测试系统功能丰富、性能提高及使用方便等很多方面比人工测试有明显改进，甚至可以完成很多人工测试无法完成的任务，显示出很大的优越性。

组建一个性能良好的自动测试系统，对提高测试速度、节约人力、获得高的测量准确度等起着很大的作用。但并非在所有电量和非电量的测试场合都要组建自动测试系统，在下列情况下组建自动测试系统是合理和必要的。

- (1) 测试任务复杂、工作量大以及多重测试的场合。
- (2) 对测试系统的功能、性能要求高，需要对数据做实时处理或对数据进行判断的测试。
- (3) 对激励须一一响应的测试场合。
- (4) 要求测量精度高的测试。
- (5) 危险场地的测试或人工难以完成的测试。
- (6) 采用一般的测试方法无法完成的测试，只要经济条件允许都应考虑组建自动测试系统。

9.3.2 组建自动测试系统的方法

在组建前必须对测试任务进行充分的分析和研究，包括测试环境、测试参数、测试要求以及数据处理情况等。只有对这些测试条件进行全面分析后，才可能对要组建的测试系统提出一个完整的总体技术要求，制定测试总体方案，并以此确定所需要的仪器和设备。根据测试任务要求选用微型计算机作为系统中的控制器，指挥整个系统工作。图 9-3 为典型的电压和频率参数的自动测试系统。由于数据处理不复杂，故选用带 GPIB 接口的通用计算机即可。选用带 GPIB 接口的频率计、数字多用表及频率合成器，计算机是系统的控制器。它根据预先编制好的测试程序，首先设定频率合成器的各种功能，并启动工作，让它输出要求的幅度和频率信号，加到被测器件，然后命令数字多用表和频率计对被测器件输出信号的幅度和频率进行测量，最后将测量数据送到计算机系统的显示器显示，或送到打印机打印。

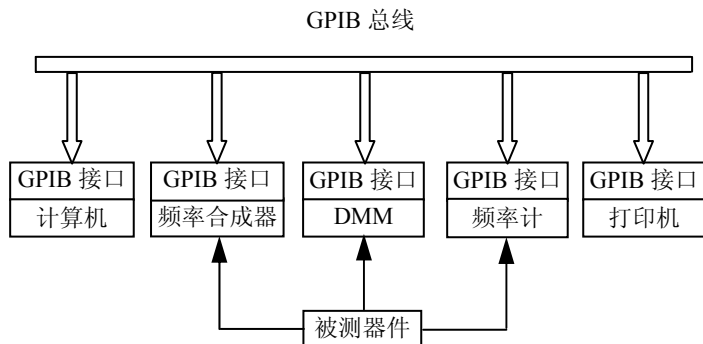


图 9-3 典型 GPIB 自动测试系统

9.3.3 自动测试系统的测试过程

采用自动测试系统测试参数，通常按以下步骤进行：

(1) 给器件设定地址。在系统工作以前首先需要给被测器件设定地址，系统中各器件有了地址才能相互区别，也才能进行编程和程序控制。

(2) 连接 GPIB 电缆。GPIB 系统对电缆长度和连接器件有一定限制，电缆总长度不得超过 20m，母线上最多可挂 15 个器件（包括系统的中央控制器在内）。需要快速传递数据时，可选用 0.5m 长的电缆。另外还要注意对 GPIB 连线器的选择。

(3) 画出测试流程图，编写测试程序。根据测试总要求，画出流程图以便分析，并为编写测试程序提供方便。

(4) 按使用要求接通各仪器电源。

(5) 将被测器件接入自动测试系统，同时连接好被测模拟信号的输入电路。

(6) 输入并启动测试程序，系统测试工作自动开始。

9.4 虚拟仪器和网络化仪器

9.4.1 虚拟仪器

1. 虚拟仪器的基本组成

虚拟仪器是智能仪器发展的新阶段。测量仪器的主要功能有数据采集、数据分析和数据显示等 3 大部分，如图 9-4 所示。

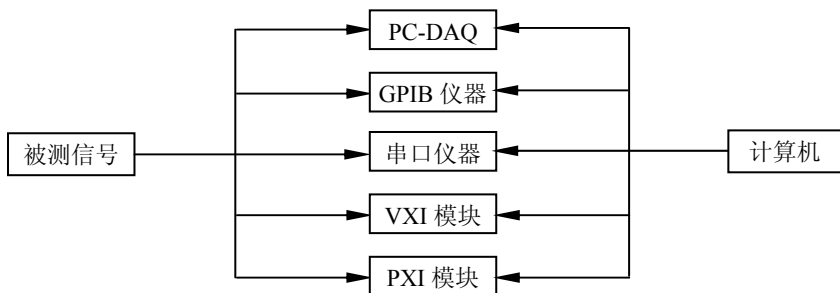


图 9-4 虚拟仪器的组成

在虚拟现实系统中，数据分析和显示完全用计算机的软件来完成。因此，只要额外提供一定的数据采集硬件就可以与计算机组成测量仪器。这种以通用计算机作为核心的硬件平台，配以相应测试功能的硬件作为信号输入/输出的接口，利用仪器软件开发平台在计算机的屏幕上虚拟出仪器的面板和相应的功能，然后通过鼠标或键盘操作，这样的仪器称为虚拟仪器。

在虚拟仪器中，使用同一个硬件系统，只要应用不同的软件编程，就可得到功能完全不同的测量仪器。仪器模块的功能主要靠软件实现，通过编程在显示屏上构成波形发生器、示波器或数字万用表等传统仪器的软面板，而波形发生器发生的波形、频率、占空比、幅值及偏置等，或者示波器的测量通道、标尺比例、时基、极性及触发信号（沿口、电平、类型等）都可用鼠标或按键设置，如同常规仪器一样使用，不过，虚拟仪器具有更强的分析处理能力。随着计算机技术和虚拟仪器技术的发展，用户只能使用制造商提供的仪器功能的传统观念正在改变，而用户自己设计、定义的范围进一步扩大；同一台虚拟仪器可在更多场合应用，比如既可在电量测量中应用，又可在振动、运动和图像等非电量测量中应用。

2. 虚拟仪器的软件结构

软件技术是虚拟仪器的核心技术。仪器软件与通用计算机软件构成虚拟仪器的软件，它用于控制硬件接口，并通过软件来完成测试任务。以 VXI 总线虚拟仪器为例，主要由 3 部分组成：应用软件开发环境、仪器驱动器以及虚拟仪器软件结构和模块。

常用的仪器用开发软件有 LabVIEW、LabWindows/CVI、VEE 等。这些软件已相当完善，而且还在升级、提高。以 LabVIEW 为例，这是基于图形化编程语言 G 的开发环境，用于如 GPIB、VXI、PXI、PCI 仪器及数据采集卡等硬件的系统构成，而且，具有很强的分析处理能力。LabVIEW 6i 的问世，将智能化测量与控制技术进一步扩展到了互联网上。

仪器驱动器是完成对某以特定仪器控制与通信的软件程序，是完成对仪器硬件控制的纽带和桥梁。

VISA (Virtual Instrument Software Architecture) 是 VXI plug&play 规范规定的生成虚拟

仪器的软件结构和模块。它统一了应用程序与系统硬件之间的底层接口软件,是现代自动测试系统的关键组成。所有自动测试系统的控制器(包括 VXI 和 GPIB 控制器)只有在具备了相应的 VISA、API 后,才能满足 VXI plug&play 的要求,也能在其上开发开放具有较强兼容性的自动测试系统。

9.4.2 网络化仪器

1. 网络仪器的基本内容

虚拟仪器技术的应用,使组建集中和分布式测控系统变得更为容易。但集中测控越来越满足不了复杂、远程(异地)和范围较大的测控任务的需求,对此,组建网络化的测控系统就显得非常必要。而计算机软、硬件技术的不断升级与进步、给组建测控网络提供了越来越优异的技术条件。

以 Internet 为代表的网络技术的出现以及它与其他高新科技的相互结合,不仅已开始将智能互联网产品带入现代生活,而且也为测量与仪器技术带来了前所未有的发展空间和机遇,网络化测量技术与具备网络功能的新型仪器应运而生。

网络化仪器是适合在远程测控中使用的仪器。这是计算机技术、网络通信技术与仪表技术相结合所产生的一种新型仪器。许多仪器仪表的远程通信能力发生着许多新的、重要的变化,最重要的一点是扩展了 Web 技术的应用,特别是扩展了传输控制协议/网络协议(TCP/IP)及浏览器和嵌套服务器的应用。比如,通过 GPIB-ENET 转换器和 RS232/RS485-TCP/IP 转换器,将数据采集仪器的数据流转换成遵循 TCP/IP 协议的形式,然后上传到 Intranet/Internet;而基于 TCP/IP 的网络化智能仪器则通过嵌入式 TCP/IP 软件,使现场变送器或仪器直接具有 Intranet/Internet 功能。它们与计算机一样,成了网络中的独立节点,很方便就能与就近的网络通信线缆直接连接,而且“即插即用”直接将现场测试数据送上网;用户通过浏览器或符合规范的应用程序即可实时浏览到这些信息(包括处理后的数据、仪器仪表的面板图像等)。虚拟仪器(VI)把传统仪器的前面板移植到网页上,通过 Web 服务器处理相关的测试需求,通过 Intranet/Internet 实时地发布和共享测试数据。

2. 网络仪器

广义地讲,把传统测试(测量)仪器或系统一旦联网,即一旦与某种合适的电子化信息载体结合在一起就组成了网络化仪器,就像电信服务运营商今天已能进行远程测试一样,就可以做到从地球上的任何地点、在任意时间,能获取到任何地方的所需要的测量信息。

(1) 网络化流量计。流量计是用来检测流动物体流量的仪表,它能记录各个时段的流量,并在流量过大或过小时报警。现在已有商品化的仪表。具有联网能力的流量计,它也被称为网络化流量计。使用它,就可以在安装过程中通过网络浏览器对其若干参数进行远

程配置。在嵌入 FTP 服务器后,网络化流量计就可将流量数据传送到指定计算机的指定文件里;STMP(简短消息传输协议)电子邮件服务器可将报警信息发送给指定收信人(指定的信箱或寻呼机)。技术人员收到报警信息后,可利用该网络化流量计的互联网地址做远程登录,运行适当的诊断程序、重新进行配置或下载新的固件,以排除障碍,而无须离开办公室赶赴现场。

(2) 网络化传感器

随着工业现代化的飞速发展和测控系统自动化、智能化技术的不断进步,传统的传感器已不能满足要求。与计算机技术和网络技术相结合,传感器从传统的现场模拟信号通信方式转变为现场级的全数字通信方式成为现实,即产生了传感器现场级的数字网络化——网络化传感器。网络化传感器是在智能传感器的基础上,把 TCP/IP 协议作为一种嵌入式应用,嵌入现场智能传感器的 ROM 中,从而使信号的收、发都以 TCP/IP 方式进行。这样,网络化传感器像计算机一样成了测控网络上的节点,并具有网络节点的组态性和互操作性。利用局域网和广域网,处在测控点的网络传感器将测控参数信息加以必要的处理后登录网络,联网的其他设备便可获取这些参数,进而再进行相应的分析和处理。

网络化传感器的应用范围很大,比如在广袤地域的水文监测中,对江河从源头到入海口,在关键测控点用传感器对水位乃至流量、雨量进行实时在线监测,网络化传感器就近登录网络,组成分布式流域水文监控系统,可对全流域及其动向进行在线监控。在对全国耕地进行的质量监测中,也同样可利用网络化的传感器,进行大范围信息的采集。随着分布式测控网络的兴起,网络化传感器必将得到更广泛的应用。

(3) 网络化示波器和网络化逻辑分析仪。例如,安捷伦科技有限公司几年前就将联网功能作为其 Infinium 系列数字存储示波器的标准性能;并且在最近又研制出了具有网络功能的 16700B 型逻辑分析仪——网络化逻辑分析仪。这种网络化逻辑分析仪可实现任意时间、任何地点对系统的远程访问,实时地获得仪器的工作状态;通过友好的用户界面,可对远程仪器的功能加以控制,进行状态检测;还能将远程仪器测得的数据经网络迅速传递给本地计算机。

9.5 小 结

本章主要介绍了智能仪器的概念、特点、基本组成及一般测量过程;自动测试系统的组建原则、方法及测试过程;虚拟仪器和网络化仪器。

要求大家通过本章的学习了解智能仪器的特点、一般测量过程;自动测试系统的组建原则和方法以及测试的过程;了解虚拟仪器和网络化仪器的基本概念。

9.6 思考题

1. 智能仪器的结构特点是什么？
2. 智能仪器是如何进行测量的？
3. 自动测试系统的结构特点是什么？它对计算机有什么要求？
4. 要组建一个测试系统需要哪些步骤？
5. 什么叫虚拟仪器？

第 10 章 测量仪器的维护

10.1 概 述

测量仪器是将被测量转换成可供直接观察的指示值或等效信息的器具，包括各类指示仪器、比较仪器、记录仪器、传感器和变送器等。它是设计、制作、测量、调试及检修各种电子设备不可缺少的工具，因此，必须经常对仪器进行维护，及时排除故障，定期校准，使仪器性能保持出厂要求的技术指标。

目前，由于电子技术、计算技术和半导体技术的发展，由单片机或系统构成的测试系统正获得广泛的应用。这种测试系统内部电路比较复杂，不仅有传感器，而且还有输入通道、微处理器（或数字信号处理器）、数显装置、接口电路及稳压电源等，并且是模拟电路与数字电路并存、硬件与软件相结合的。它在工作时，不仅容易受到外界干扰，而且系统本身也会产生干扰。为了提高系统的可靠性，必须有效地抑制各种干扰。

10.2 实验室抗噪声技术

通常各种电子测量仪器会向外漏泄电磁能，特别是晶体管电路和集成电路的广泛应用以及整机电路日益小型化，使电子测量仪器的体积大为缩小。大量的单元电路安装在一个很小的机腔内，相互之间干扰的可能性增加，同时各种电子测量仪器都是在一定的环境条件下工作的，不可避免地存在着由自然因素或人为因素产生的干扰（噪声）。这些干扰通过一定的途径进入电子设备，从而产生正常工作情况下所不需要的干扰信号。我们把影响电子测量仪器正常工作的信号称为干扰信号或噪声。在实验室中干扰是客观存在的，很难完全消除。干扰可能是仪器内部本身产生的，也可能是从外部串扰来的，当内外两种干扰超过仪器所允许的量时，就会使电子测量仪器工作的质量降低或根本不能工作。为了确保电子测量仪器正常工作，必须使电子测量仪器中的有用信号远强于干扰信号。为此，我们必须了解实验室干扰的来源及相应的抗干扰技术。

10.2.1 实验室干扰的来源

在电子技术中,噪声是指除有用信号以外的一切不需要的信号和各种电磁干扰的总称。

1. 干扰源

在电子测量仪器和测量系统工作时,可能受到各种干扰而产生测量误差。从众多的随机干扰现象中判断出干扰的来源绝非易事。但是,如果对干扰的来源没有足够的认识而盲目地套用某些抗干扰技术只能是事倍功半。因此我们必须先了解电子测量中的干扰源有哪些,然后根据测量中出现的干扰现象及它们的特征,判断出它是什么样的干扰,才能采用相应的抗干扰措施。

凡是能够产生干扰,而且可能影响到周围电路正常工作的物体或设备,都可以认为是干扰源。干扰源一般分为以下3类。

(1) 自然界的干扰源:如雷电、太阳黑子、宇宙射线等。

(2) 物质固有的干扰源:如热噪声和散粒噪声等。

(3) 人为干扰源,主要包括以下几种:

① 电网干扰源,如50Hz工频干扰。

② 家用电器干扰源,如日光灯干扰。

③ 电刷干扰源,如电机干扰。

④ 电气和电子设备干扰源,如手机、广播、电视等。

⑤ 电路过渡过程引起的干扰源,如电路中的电感或电容产生的瞬变电压或瞬变电流。

⑥ 有意制造的干扰源,如电子对抗战、电磁脉冲炸弹。

2. 干扰信号的基本形式

干扰信号的形式有多种多样,常以电流、电压、电场、磁场、电磁波、漏阻抗、温度及湿度等形式出现。对电子测量仪器工作影响较大的干扰信号主要有电场和磁场两大类。电信号对测量产生的干扰主要有传导耦合和经公共阻抗耦合两种耦合方式,而磁信号对测量产生的干扰信号主要通过电磁感应耦合方式。对于电子测量来说,在分析干扰引起的测量误差时,各种形式的干扰信号最终都需要变成电压和电流这样两种基本形式。

3. 干扰信号进入测量仪器的途径

干扰信号必须以某种途径进入电子测量仪器才能引起测量误差,常见的途径有以下几种:

(1) 干扰信号以电磁波的形式,从空间进入电子测量仪器。

(2) 干扰信号以漏电和耦合的形式,以绝缘或支承物等(包括空气)为媒介,通过阻抗进入电子测量仪器。

(3) 通过电子测量仪器的端钮与被测量一起混入电子测量仪器形成干扰。

10.2.2 实验室抗干扰技术

电子测量仪器的电路比较复杂,产生干扰的原因很多,所以使用抗干扰技术要有针对性,不能盲目套用抗干扰技术。根据干扰源及干扰信号的不同,实验室抗干扰技术主要有以下几种。

(1) 抑制传输线上的干扰。传输线宜选用双绞线或同轴电缆屏蔽线。

(2) 增加干扰源与电子测量仪器的距离,并用地线把它们隔离。

(3) 电子测量仪器和大功率器件的地线要单独接地,以减小互相干扰。

(4) 在仪器的 I/O 口、电源线及电路板连线等关键地方,使用抗干扰元件(如电源滤波器、屏蔽罩、磁珠和磁环等)。

(5) 注意静电的防护。在人类生活的环境中,静电是无处不在的。而且静电的危害极大,轻则击穿二极管,重则损坏仪器内部集成电路。所以,实验室一定要做好静电防护。场地应禁止铺设地毯,仪器设备间的入口处应设置消除静电的脚垫,操作人员在使用仪器时也应佩戴防静电腕带。

(6) 防止漏电流技术。应当在清洁、干燥、通风、环境温度适宜的条件下使用电子测量仪器。

(7) 采用软件抗干扰技术。软件抗干扰技术主要有以下几种:

① 利用数字滤波器。数字滤波器亦称软件滤波器,它通过计算机执行一段相应的程序滤除夹杂在数字信号中的干扰信号。

② 多次采样技术。当干扰信号属于离散的、作用时间很短的尖脉冲时,可采用软件对输入数据信息进行多次采样,若采样结果一致,则是真输入信号;若相邻的采样内容不一致或多次采样的结果不相符,则是伪输入信号。

③ 定时刷新输出口。在电子测量仪器中 I/O 电路一般靠近边缘,外部电磁噪声容易对其造成影响,因此,定期刷新输出口可以减少输出口的干扰。

10.3 仪器的维护与故障诊断

10.3.1 电子测量仪器的维护

电子测量仪器故障的特点往往是由于电、热、潮、氧化及腐蚀等因素而使个别元件或接线或接点失效,导致整机不能工作。为了减少故障,确保安全使用,必须做好电子测量仪器的维护工作,以早期发现和排除可能的故障。电子仪器的维护工作,可以归纳为以下几个方面。

1. 日常维护

电子测量仪器的日常维护工作十分重要, 如果不加以足够的重视, 往往会直接影响仪器的性能, 严重时甚至会丧失仪器的使用价值。日常维护包括以下几方面的工作。

(1) 技术资料的管理

当前电子测量仪器门类繁多, 型号各异, 电路结构复杂, 因此, 积累和保存仪器的技术资料是检修工作中的一个重要环节, 它可以帮助人们了解仪器的基本情况、技术性能、检修的重点及正确的使用方法等。其中技术资料应包括仪器的技术说明书、出厂时的技术数据、以前的维修记录、平时使用的情况记录及定期检定的测试数据等。

(2) 仪器的保管

仪器保管的好坏将直接影响到仪器的正常工作及使用寿命。仪器保管的环境条件一般为:

- ① 环境温度 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- ② 相对湿度 $50\% \sim 80\%$ (温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)。
- ③ 室内清洁无尘、无腐蚀性气体。
- ④ 仪器周围无强电磁场。

另外, 在仪器保管的时候还应注意以下几个问题:

① 防潮。潮气会使电子仪器内部的元器件绝缘性能下降, 尤其是用纤维材料制成的绝缘材料, 如变压器、线圈、绕线电位器及表头动圈等, 都会因受潮而霉烂断线, 而且潮气还会使金属部件生锈。因此, 仪器应放在向阳、透风且干燥的房间内, 不要直接放在水泥地上或紧靠墙壁, 也不要放在窗口, 以防太阳直接照射。长期不用的仪器应定期通电驱潮, 每次通电 2~4 小时即可。

② 防尘。由于灰尘具有吸湿性, 当仪器内积满尘埃时, 会使仪器的绝缘性能变坏, 或使活动部件和接触部件间的磨损加剧, 或者导致电击穿, 使仪器无法正常工作。所以电子仪器应定期用吸尘器、皮老虎或长毛刷进行除尘, 接触点可用四氯化碳或酒精擦净。平时仪器不用时应加盖仪器罩, 仪器罩最好用质地细密的编织物, 既可防尘, 又有一定的透气性, 塑料罩使潮气不易散发, 不易使用。

③ 防震。在搬运或移动仪器时应小心轻放, 避免震动或碰撞, 在放置仪器的桌面上, 不应进行敲击锤打的工作, 靠近仪器集中存放的地方, 不应装置震动很大的机电设备。

④ 防腐蚀。为了防止酸、碱等气体对电子仪器的腐蚀, 切忌将蓄电池与电子仪器放在一起, 也不要采用石灰作为防潮剂。电子仪器内部的干电池如果长期不用, 应取出另行存放。

(3) 仪器的定期检查

电子仪器一般都应进行定期检查。外观检查附件是否齐全, 仪器面板上的旋钮、开关、接线柱及插座等是否有松动、滑位、损坏及表头是否卡针等。通电检查仪器的基本功能是否正常。仪器在使用交接时, 都应进行类似的检查, 以便及时发现问题。

2. 仪器的使用

电子仪器若使用方法不当,轻则影响正常工作,重则造成仪器损坏。各种仪器的用途不同,它们的使用方法也各异,即使同种仪器,因型号不一,使用方法也不尽相同。因此,初次使用时,必须仔细阅读仪器的使用说明书,牢记使用注意事项,严格遵循规定的操作步骤。使用仪器时一般应注意以下事项:

(1) 仪器开机前的注意事项

首先检查供电电压与仪器工作电压是否相符。电源电压变换装置是否位于相应电压值的部位。然后再检查面板上的各种开关、旋钮及插座等是否完好,最后将面板上的“增益”、“输出”、“辉度”和“调制”等控制旋钮置于最小位置。另外,对有“高压”、“低压”开关的仪器必须先接通“低压”开关,机器预热 5~10 分钟后,才能接通“高压”开关。在被测量未能估计的情况下,应将仪器的“衰减”或“量程”放在较大部位,以免仪器过载受损。

(2) 仪器开机时的注意事项

电子测量仪器接通电源后,如发现异常现象,如嗡嗡声、噼啪声、糊味、冒烟或保险丝立即烧断等,应立即切断电源,在未查明故障原因时,不能再次通电,以免故障进一步扩大。对于有通风设备的电子测量仪器,开机通电后应注意仪器内部的电风扇是否正常运转,如果发现风扇运转不正常,也应立即切断电源进行检修。

(3) 仪器使用时的注意事项

在使用仪器时,应注意机壳接地,特别是在多台机器连用时,应用金属编织线作为多台仪器的接地连线,避免杂散电磁场的干扰;在进行测试时,应先连接“低电位”(如地线)端子,然后再连接“高电位”(如探测器的探针等)端子;反之,测试完毕后应先断开“高电位”端子,再断开“低电位”端子。

(4) 仪器使用后的注意事项

仪器使用完毕后,应先切断仪器的开关,再拔下仪器的电源插头,对于有高低压电源开关的仪器,应先切断高压电源开关,再切断低压电源开关。然后将面板上的“增益”、“输出”、“辉度”和“调制”等控制旋钮置于最小位置。将仪器的“衰减”或“量程”放在最大位置。最后应填写“仪器使用卡”,特别是在发生故障时,应详细记录当时情况以供维修人员参考。

3. 仪器的校准

电子测量仪器在使用一段时间后,都要对它的质量进行检查,看它的准确度是否还合乎仪器所标明的准确度,这个过程就叫对仪器做校验。

在进行仪器校验时,首先要对被校器进行外观检查,看是否有零件脱落或损坏之处,然后再通电观察有无故障。经过检查确认没有任何故障后,再进行校验。

仪器的校验一般都采用被校仪器与标准仪器示值直接比较的方法,称为直接比较法。

标准仪器的测量上限不应超过被校仪器上限的 25%。校准应按照如下方法进行。

(1) 校验次数。确定被校表基本误差时,应在标度尺的工作部分每一个带有数字的分度线上进行如下次数的测量。

① 对于 0.1 级和 0.2 级标准表应进行 4 次,即上升和下降各做一次,然后改变通过仪表的电流方向,再重做上述测量。

② 对于磁电式和 0.5 级以下的其他系列仪器仅在一个电流方向上校验两次。

(2) 校验条件。对于 50Hz 的交直流两用表,一般仅在直流下校验。对于有额定频率的交流仪器,应在额定频率下校验。对于有额定频率及扩展频率范围的交直流两用仪器(或交流仪器),一般对一个量限在直流下全校。校验在直流下与交流下准确度级别不同的仪器时,应在直流下与交流下分别进行校验。

(3) 校验方法。确定多量限测量仪器误差时,可以用如下方法进行校验:

① 共用一个标度尺的多量限电压表和电流表,可对其中某一个量限的全部数字分度线进行校验。

② 电压表的高压档可以采用测量附加电阻的方法进行校验。

10.3.2 电子测量仪器的维修与故障诊断

电子测量仪器和其他设备一样,在长时间的工作之后会由于各种原因使其性能降低,甚至不能正常工作。电子测量仪器维修工作是为防止仪器性能下降,排除仪器故障,解决仪器缺陷所进行的维修工艺。其目的是保持或恢复仪器应有的性能,提高其可靠性,使其在较长时间工作时能处于最佳工作状态。所以电子测量仪器的维修工作对保证仪器的正常工作有着十分重要的作用。一般步骤如下。

1. 了解故障发生情况

检修仪器前,应详细了解故障发生的情况和故障现象,这对维修时正确判断故障的性质和范围有很大作用,可少走弯路,缩短维修时间。

2. 分析仪器的工作原理

一些仪器的正确工作状态,需要各个旋钮配合使用,若配合不当,就可能导致仪器工作不正常。这种情况并不属于仪器本身的故障,而是使用人员不了解使用方法所致。如果急于检修,往往会造成时间的浪费,或者由于不留心反而越修越糟,因此,在着手维修之前,维修人员一定要仔细阅读技术说明书或图纸等有关资料,查阅他人的维修经验和维修档案。

3. 拟定测试方案

表面检查完以后,就可以通电检查了,尤其是接通电源的瞬间,一定要高度集中注意

力,保持视觉、听觉与嗅觉的高度灵敏。迅速查找有无发生冒烟、打火、特殊声响及元器件烧红等,如果发现可疑现象,应迅速关机,查找原因。关机后可用手迅速触摸元器件、导线、变压器等,是否有发热等异常现象,如果没有,就可以进行下一步检查了。

4. 分析测试结果

根据前面的基本现象及测试观察到的现象,在掌握工作原理的基础上,加上已有的维修经验,故障的范围是不难判断的。

5. 故障检修

判断出故障的范围以后,就可以采取某些检修方法对症下药,找出故障点并排除故障。检修方法大致有以下几种:

(1) 参数测量法。参数测量法通常用万用表、电容及电感表等测试仪器,检查线路中的工作电压、静态工作电流、对地电阻以及元件参数等来确定故障。通常电路图中均已标出这些参数,若未标出亦可通过估算大致确定。元件的正常参数一般凭经验得知或由有关手册给出。测量时应当正确选用仪表及其量程,以免损坏仪表或测得的数据不准确。

(2) 波形观察法。波形观察法是检查稳压电源、脉冲数字电路和振荡器等常用的方法。在这种电路中,有各种脉冲的产生、变换、传递以及振荡波形,因此,可以用示波器来观察波形的幅度、频率和形状,看是否符合要求。

(3) 信号跟踪法。信号跟踪法是信号检测、放大及处理电路故障最有效的手段,具体方法是用示波器沿着电路的信号通路,由前向后逐级观察信号是否通畅,有无畸变等异常情况,以确定故障范围。

(4) 电路分割法。电路分割法也是最常用的方法之一,它通过将故障无关的电路或部分逐级分割排除,以逐步缩小故障范围,直至查出故障元件。

(5) 电容旁路法。电容旁路法是指当用示波器查到电路中有自激振荡、噪声、干扰或电源纹波较大时,可以选择适当的测试点,利用适当容量的电容器临时跨接在测试点与参考接地点之间,通过旁路或交流短路去掉有害噪声、干扰等交变信号,并且可判断干扰等的来源。

(6) 等效取代法。等效取代法是用正常的元件、单元及系统去替代电路中具有故障嫌疑的相应元件、单元或系统,这是一种行之有效而又十分方便的方法。通常对各种集成块的查修均采用这种方法。

(7) 元件调试法。元件调试法适用于解决一些“软毛病”,即仪器工作基本正常,但存在工作不稳定,可调元件失调引起的异常。可以微调一下可调器件来消除。但要注意,如果调节可调器件不起作用,一定要将可调器件调回到原来状态,以防越调越乱。

(8) 整机对比法。整机对比法是指在进行故障检查时,如果同时还有一台同型号的正常仪器,检查过程中就可以分别对照这两台仪器各部分的电压、电流、工作波形、对地电阻及元件参数等数据,并将它们进行比较以查出故障。

(9) 敲击振动法。敲击振动法是检查虚焊的插件等接触不良的一种常用方法。仪器表面的插脚和焊点很多, 由于接触不良或虚焊, 往往使机器时好时坏, 很难检查。遇到这种情况, 可轻轻敲击各个部位, 对敲击最敏感的部位, 可能就是有虚焊或接触不良的部位, 然后再仔细检查, 最终确定故障部位。

(10) 焊点处理法。所谓焊点处理法只不过是怀疑的焊点重焊一遍, 直至故障消失。

6. 修复后性能检定

应对修复后的仪器进行定性测试, 初步检查其主要性能是否正常, 如果更换元器件后将影响仪器的主要技术性能指标时, 应对仪器进行重新调整。为了全面检查, 还需用计量检定。

7. 填写检修记录

修复仪器后, 应该认真填写检修记录。检修记录的内容除了仪器名称、型号、生产厂家、机号、送修日期和修复日期等一般性内容外, 重点应填写仪器的故障现象, 损坏经过, 检验结果和原因分析。把实践经验上升到理论高度, 然后举一反三, 从而不断提高自己的技术水平。

10.4 小 结

本章介绍了实验室抗噪声技术, 重点介绍了仪器的抗干扰技术及仪器的维护与故障诊断。

要求大家了解实验室干扰的来源及实验室抗干扰技术; 掌握电子测量仪器的维护、维修与故障诊断, 提高其可靠性, 降低故障率, 确保其正常工作, 并使其处于良好的备用状态。充分认识到正确使用与维护仪器, 及时排除故障, 定期校准, 使仪器性能保持出厂的技术指标, 是充分发挥电子仪器效益的保证。

10.5 思考题

1. 长期不用的仪器为什么一定要定期通电?
2. 电子测量仪器的干扰源有几种, 分别是什么?
3. 故障检查的一般步骤是什么?
4. 常用的检查故障的方法有几种?

参 考 文 献

1. 张永瑞等. 电子测量技术基础. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994
2. 沙占友. 数字化测量技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2004
3. 陈传硕等. 数字测量仪表. 北京: 中国计量出版社, 1991
4. 古天祥. 电子测量原理. 北京: 机械工业出版社, 2004
5. 李明生. 电子测量仪器与应用. 北京: 电子工业出版社, 2001
6. 陆绮荣. 电子测量技术. 北京: 电子工业出版社, 2003
7. 刘国林. 电子测量. 北京: 机械工业出版社, 2003
8. 张咏梅. 电子测量与电子电路实验. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000
9. 熊谷文宏. 图解电气电子测量. 北京: 科学出版社, 2001
10. 宋悦孝. 电子测量与仪器. 北京: 电子工业出版社, 2003
11. 宋启峰. 电子测量技术. 重庆: 重庆大学出版社, 2000
12. 何超. 现代电工电子测量技术. 北京: 中国人民大学出版社, 2000
13. 张学庄. 电子测量与仪器. 湖南: 湖南科学技术出版社, 2000
14. 梅邨. 常用电子仪表的使用和维护. 北京: 人民邮电出版社, 1997
15. 茅中良. 常用电子测量仪器使用与维修手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1993
16. 肖晓萍. 电子测量实训教程. 北京: 电子工业出版社, 2002
17. 杨龙鳞. 电子测量技术. 重庆: 重庆大学出版社, 2004
18. 赵微存, 黄进良. 电子测量技术基础. 重庆: 重庆大学出版社, 2000
19. 徐洁. 电子测量与仪器. 北京: 机械工业出版社, 2003
20. 林占江. 电子测量技术. 北京: 电子工业出版社, 2003
21. 任致程等. 万用表测量电工电子元器件 300 例. 北京: 机械工业出版社, 2003
22. 吴国忠. 常用电子仪器的原理、使用及维修. 杭州: 浙江大学出版社, 2002
23. 申忠如. 电气测量技术. 北京: 科学出版社, 2003