



军队“2110”工程三期建设教材

电子设备检测与故障分析

DIANZI SHEBEI JIANCE YU GUZHANG FENXI

左东广 ◎ 主编

张欣豫 张永生 樊天锁 ◎ 编



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



军队“2110”工程二期建设教材

电子设备检测与故障分析

左东广 主编

张欣豫 张永生 樊天锁 编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以电子测量的基本概念为基础,全面讲述了常用测量仪器、电路参数检测、电子设备故障分析的相关技术和理论。内容包括:电子测量的基本概念、内容和测量的基本方法,电子测量仪器的基本概念、常用测量仪器的基本原理和主要技术指标,时间、频率、功率、波形等电路参数和特征的测量及电子设备故障分析基础知识和故障的产生机理,每一章后都附有思考题。

本书可作为普通高校电子类专业的教材或参考用书,也可供从事电路分析与电子系统设计领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子设备检测与故障分析 / 左东广主编. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2016. 1

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1949 - 0

I. ①电… II. ①左… III. ①电子设备—检测②电子设备—故障诊断 IV. ①TN06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 273515 号

版权所有,侵权必究。

电子设备检测与故障分析

左东广 主编

张欣豫 张永生 樊天锁 编

责任编辑 赵延永 苏俊亚

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:6.25 字数:160 千字

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1949 - 0 定价:20.00 元

前 言

依据新时期军队信息化建设对人才培养提出的新要求,结合第二炮兵工程大学新版人才培养方案及课程标准修订相关工作的具体要求,在总结多年教学实践经验的基础上,我们编写了这本颇具特色的简明教材。全书以电子测量的基本概念为基础,按照常用测量仪器、电路参数检测、电子设备故障分析的顺序,强调对电路参数检测方法的把握,以典型电路故障案例为平台,以电子设备检测技术为手段,以故障分析与处理基本技能的培养为目标,将理论与实践进行紧密的结合,提高学员对实际问题的分析与处理能力。全书的内容主要为:

第1章讲述电子测量的基础,主要内容为电子测量的基本概念、内容和测量的基本方法,重点介绍功率、波形、脉冲宽度等时域测量参量及频率、阻抗、带宽等频域测量参量的基本概念。

第2章讲述常用的测量仪器,重点介绍电子测量仪器的基本概念、常用测量仪器的基本原理和主要技术指标。

第3章以电量测量为基础,重点讲述对时间、频率、功率、波形等电路参数和特征的测量,以时间测量、频率测量、功率测量、波形检测等的基本原理和方法为主要内容。

第4章重点介绍电子设备故障分析基础知识,建立电子设备故障的概念,了解故障的产生机理,掌握常见故障诊断的一般方法,能够综合运用所学知识对常见电子设备故障进行分析和检测。

本书的目的是让学生综合利用电路分析、信号处理、故障诊断等技术解决电子设备检测与故障分析的一般问题,并可以掌握电子设备检测的基本原理,熟悉电路参数测量的基本方法,具备电子设备一般电路故障分析和检测的能力,进而养成科学严谨的良好习惯。

在编写过程中,参考和引用了大量同类教材相关内容,在此向作者表示衷心的感谢。由于编者水平有限,存在错误不足之处在所难免,恳请同行和读者批评指正。

编 者

2015年12月

目 录

第 1 章 电子测量基础	1
1.1 电子测量的基本概念	1
1.1.1 测量的基本概念	1
1.1.2 电子测量的内容	1
1.1.3 电子测量方法的分类	2
1.2 电子测量的基本参数	4
1.2.1 时域测量参数	4
1.2.2 频域分析参数	7
思考题	8
第 2 章 常用的测量仪器	9
2.1 电子测量仪器概述	9
2.1.1 电子测量仪器分类	9
2.1.2 电子测量仪器的主要技术指标	10
2.2 信号发生器	11
2.2.1 信号发生器简介	11
2.2.2 测量信号源的分类	11
2.2.3 信号发生器的应用	13
2.3 示波器	14
2.3.1 示波器简介	14
2.3.2 示波器的基本原理	14
2.3.3 数字示波器	17
2.3.4 示波器的选择和使用	20
2.4 频谱分析仪	20
2.4.1 频谱分析仪简介	21
2.4.2 频谱分析仪分类	21
2.4.3 频谱分析仪工作原理	22
2.4.4 频谱分析仪主要技术指标	24
思考题	25
第 3 章 电路参数测量	26
3.1 时间与频率测量	26
3.1.1 概 述	26

3.1.2 时间频率标准·····	27
3.1.3 时间与频率的测量原理·····	29
3.1.4 时间和频率高精度测量技术·····	33
3.1.5 微波频率测量技术·····	34
3.1.6 频率稳定度与频率比对·····	36
思考题·····	39
3.2 电压与功率测量·····	40
3.2.1 电压与功率测量的表征·····	40
3.2.2 电压与功率测量方法分类·····	42
3.2.3 电压测量原理·····	43
3.2.4 射频微波功率的测量·····	50
3.2.5 数字电压表的特性·····	55
3.2.6 电压测量的干扰及抑制技术·····	57
3.3 信号波形测量·····	59
3.3.1 信号波形的模拟测量·····	59
3.3.2 波形的数字测量·····	60
3.4 信号的频谱测量·····	64
3.4.1 概 述·····	64
3.4.2 扫描式频谱仪·····	66
3.4.3 傅里叶分析仪·····	69
3.4.4 模数混合型外差式频谱分析仪·····	70
3.4.5 频谱仪的应用·····	72
思考题·····	72
第4章 电子设备故障分析 ·····	73
4.1 电子设备的特点和故障的关系·····	74
4.2 故障的分类·····	75
4.2.1 按故障的表现分类·····	75
4.2.2 按产生的原因分类·····	75
4.2.3 按产生故障的后果分类·····	75
4.2.4 按故障的责任分类·····	75
4.3 电子设备故障的规律·····	75
4.3.1 典型故障规律·····	75
4.3.2 复杂设备无耗损规律·····	76
4.3.3 全寿命故障率递减规律·····	77
4.3.4 故障规律对检测维修的影响·····	78
4.4 电子设备的故障机理分析·····	78
4.4.1 外部环境因素对故障的影响·····	79
4.4.2 设备内部机理对故障的影响·····	79

4.5 电子设备的故障诊断.....	82
4.5.1 故障诊断的一般流程.....	82
4.5.2 故障诊断的基本方法.....	83
4.5.3 电子设备查找故障的典型方法.....	85
参考文献	90

第 1 章 电子测量基础

检测过程在现代生活中无处不在。设备出现故障时需要通过对设备的详细检测进行故障定位与排除。一个城市的交通拥堵情况也需要通过对各交通干道车辆通过率的实时检测加以判断;家庭生活中用水、用电、用气的多少都需要通过水表、电表、气表对水流量、电量和气流量进行检测。一个完整的检测过程一般包括信息的提取、信号的转换、存储与传输、信号的显示记录和信号的分析处理。检测技术是涉及检测方法、检测结构以及检测信号处理的一门综合性技术。检测与测量的含义基本相同,主要是指以确定被测对象属性和量值为目的的全部操作。

对电子设备的检测是利用电子测量的手段对电子设备进行分析的一种方法。本章重点介绍电子测量的基础知识。

1.1 电子测量的基本概念

1.1.1 测量的基本概念

测量的目的就是取得用数值和单位共同表示的被测量的结果,是人们借助于专门的设备,依据一定的理论,通过实验的方法将被测量与已知同类标准量进行比较而取得测量结果。

电子测量是指以电子技术为基本手段的一种测量技术,是测量学和电子学相互结合的产物。广义的电子测量是指利用电子技术进行的测量。狭义的电子测量是指对电子技术中各种电参量进行的测量。

近几十年来,计算技术和微电子技术的迅猛发展为电子测量和测量仪器增添了巨大的活力。电子计算机尤其是微型计算机与电子测量仪器相结合,构成了一代崭新的仪器和测试系统,即:人们通常所说的“智能仪器”和“自动测试系统”。它们能够对若干电参数进行自动测量、自动量程选择、数据记录和处理、数据传输、误差修正、自检自校、故障诊断及在线测试等,不仅改变了若干传统测量的概念,更对整个电子技术和其他科学技术产生了巨大的推动作用。现在,电子测量技术(包括测量理论、测量方法、测量仪器装置等)已成为电子科学领域重要且发展迅速的分支学科。

1.1.2 电子测量的内容

电参量测量的主要内容如下。

1. 能量的测量

能量的测量主要指的是对各种电路信号频率、波形下的电流、电压、功率和电场强度等参量的测量。

2. 电路参数的测量

电路参数的测量主要指的是对电阻、电感、电容、阻抗、品质因数及损耗率等参量的测量。

3. 信号特性的测量

信号特性的测量主要指的是对频率、周期、时间、相位、调幅度、调频指数、失真度、噪声以及数字信号的逻辑状态等参量的测量。

4. 电子设备性能的测量

电子设备性能的测量指的是对通频带、选择性、放大倍数、衰减量、灵敏度和信噪比等参量的测量。

5. 特性曲线的测量

特性曲线的测量主要指的是对幅频特性、相频特性、器件特性等特性曲线的测量。

上述各项测量内容中,尤以对频率、时间、电压、相位和阻抗等基本电参数的测量更为重要,它们往往是其他参数测量的基础。例如:放大器的增益测量实际上就是对输入、输出端电压的测量,再取以对数得到增益分贝数;脉冲信号波形参数的测量可归结为对电压和时间的测量。

由于时间和频率测量具有其他测量所不可比拟的精确性,因此常把对其他待测量的测量转换成对时间或频率的测量方法和技术。实际中,常常需要对许多非电量进行测量。传感技术的发展为这类测量提供了新的方法和途径,可以利用各种敏感元件和传感装置将非电量(如位移、速度、温度、压力、流量和物质成分等)变换成电信号,再利用电子测量设备进行测量。在一些危险的和人们无法进行直接测量的场合,这种方法几乎成为唯一的选择。

1.1.3 电子测量方法的分类

一个物理量的测量可以通过不同的方法实现。测量方法选择得正确与否直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量工作的经济性和可行性。不当或错误的测量方法除了得不到正确的测量结果外,甚至还会损坏测量仪器和被测量设备。有了先进精密的测量仪器设备,并不等于就一定能获得准确的测量结果。必须根据不同的测量对象、测量要求和测量条件,选择正确的测量方法和合适的测量仪器,构成实际的测量系统,进行正确、细心的操作,才能得到理想的测量结果。

测量方法的分类形式有多种,几种常见的分类方法如下。

1. 按测量过程分类

按测量过程分类,测量可以分为直接测量、间接测量和联合测量。

(1) 直接测量

直接测量是指直接从测量仪表的读数获取被测量值的方法,例如:用电压表测量晶体管的工作电压,用欧姆表测量电阻阻值,用计数式频率计测量频率,用弹簧管式压力表测量锅炉压力等。直接测量的特点是不需要对被测量与其他实测量进行函数关系的辅助运算,因此测量过程简单、迅速,是工程测量中广泛应用的测量方法。

(2) 间接测量

使用仪表进行测量时,首先应对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,利用直接测量量与被测量之间的关系(可以是公式、曲线或表格等)间接得到被测量值。这种测量方法称为间接测量。例如:需要测量电阻 R 上消耗的直流功率 P ,可以通过直接测量电压 U 、电流 I ,而后根据函数关系 $P=UI$,经过计算“间接”获得功耗 P 。

间接测量费时、费事,常在以下情况使用:直接测量不方便、间接测量的结果较直接测量更

为准确,或缺少直接测量仪器等。

(3) 联合测量

当某项测量结果需要用多个未知参数表达时,可通过改变测量条件进行多次测量,根据测量量与未知参数间的函数关系列出方程组并求解,进而得到未知量,这种测量方法称为联合测量。一个典型的例子是电阻器温度系数的测量。已知电阻器阻值 R_t 与温度 t 间满足关系

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1.1)$$

式中, R_{20} 为 $t = 20^\circ\text{C}$ 时的电阻值,一般为已知量; α 、 β 称为电阻的温度系数; t 为环境温度。

为了获得 α 、 β 值,可以在 2 个不同的温度 t_1 、 t_2 (t_1 、 t_2 可由温度计直接测得) 下测得相应的 2 个电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} ,代入式(1.1)得到联立方程

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \alpha(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \alpha(t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1.2)$$

求解联立方程(1.2),就可以得到 α 、 β 值。如果 R_{20} 也未知,则可在 3 个不同的温度下分别测得 R_{t1} 、 R_{t2} 、 R_{t3} ,列出由 3 个方程构成的方程组并求解,进而得到 R_{20} 、 α 和 β 。

2. 按测量方式分类

按测量方式分类,可以分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

(1) 偏差式测量法

在测量过程中,用仪器仪表指针的位移(偏差)确定被测量大小的方法,称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时标准量具不装在仪表内,而是事先用标准量具对仪表读数、刻度进行校准,实际测量时根据指针偏转大小确定被测量值。例如:使用万用表测量电压、电流等。由于从仪表刻度上直接读取被测量,包括大小和单位,因此这种方法也叫直读法。

(2) 零位式测量法

零位式测量法又称做零示法或平衡式测量法。测量过程中,将被测量与基准量相比较(又称做比较测量法),用指零仪表(零示器)指示被测量与标准量平衡,通过已知的基准量获得被测量的大小。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内,在测量过程中,标准量直接与被测量相比较;测量时,要调整标准量,直到被测量与标准量相等,即使指零仪表回零。利用惠斯通电桥测量电阻(或电容、电感)就是这种方法的一个典型例子,如图 1-1 所示。

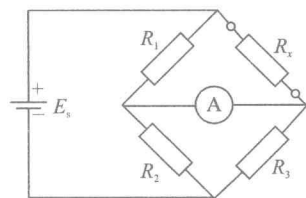


图 1-1 惠斯通电桥测量电阻

只要指零仪表的灵敏度足够高,零位式测量法的测量准确度几乎等于标准量的准确度,因而这种方法的测量准确度很高,这是它的主要优点,常用在实验室作为精密测量的一种方法。但由于测量过程中为了获得平衡状态需要进行反复调节,因此即使采用一些自动平衡技术,测量速度仍然较慢,这是这种方法的不足之处。

(3) 微差式测量法

微差式测量法综合了偏差式测量法和零位式测量法的优点。微差式测量法通过测量待测量与标准量之差(通常该差值很小)来得到待测量的值。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内,在测量过程中,标准量直接与被测量相比较。由于二者量值相接近,因此测量过程中不需要调整标准量,而只需要测量二者的差值即可。微差式测量法的优点是反应速度快,而且测量精度高,省去了反复调节标准量大小以求平衡的步骤,特别适用于在线控制参数的检测。

1.2 电子测量的基本参数

1.2.1 时域测量参数

1. 电流、电压与电阻

在对电子设备进行检测时,必须十分清楚要测量的参数。一般的电气参数标明了常用的电量单位及其标准缩写。这些标准电气单位可用前缀(毫、千等)来描述。

电流(测量单位为 A)是电荷(测量单位是 C)的流动。电荷是由通过一个已知点的电子数来确定。1 个电子有 1.602×10^{-19} C 的负电荷,或者说,1 C 负电荷含 6.242×10^{18} 个电子。电流单位(A)是用 1 s 在一个已知点通过的电荷库数来确定的(即 1 A 等于 1 C/s)。已知时间内通过的电荷越多,电流越大。虽然电流是由电子流动形成,但标准电气工程惯例还是视电流为正电荷流动。用这个定义,电流的流动方向被认为与电子流的方向相反(电子是负性电荷)。

电压是指电场或电路中两点之间的电位差,是使电荷移动和电流流动的电力或电压,是衡量电场做功能力大小的物理量。电压的单位是伏特(V),是国际单位制(SI)中的一个导出单位。

电阻是遵循欧姆定律的电子元件,欧姆定律说明通过电阻的电流与跨在电阻两端的电压成正比。回顾一下相似的水管:当压力(电压)增加时,水流(电流)量也增加;那么电压减少,电流也减少,阻力与水管的粗细有关,水管越粗,对水流的阻力越小,大水管(电阻小)在一定压力(电压)下允许大水量(电流)流过。电阻的这个名称就是由于器件阻挡电流的工作状态而得名的。电阻越大,阻力越大,电流就越小(假设电压为恒定)。

2. 功率

功率是指物体在单位时间内所做的功,或者单位时间内转移或转换的能量。对直流电压和电流来说,功率可表示为 $P = V \cdot I$,单位为 W。

注意:功率的计算是根据流过某单元电路的电流和电压大小来进行的。假使没有电流的流通通道,即使电压高,也没有功率,或者若是器件两端电压为 0,则即使有大电流流过该器件,也没有功率产生。

当电阻上有交流电压时,电阻消耗的平均功率为

$$P = V_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{RMS}}^2}{R} = I_{\text{RMS}}^2 R \quad (1.3)$$

式中,下缀 RMS 表示相关参数的均方根值。某一个周期为 T 的信号波形的电压有效值可按式(1.4)进行计算

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} \quad (1.4)$$

只要是使用电压和电流的 RMS 值,这一关系适用于任何波形,这些等式如同在直流情况下一样有相同的形式,这就是使用 RMS 值的理由之一。RMS 值通常称为有效值,因为已知 RMS 值的交流电压与相同数值的直流电压产生相同效果(功率方面的效果)。此外,两个具有相同 RMS 值的交流信号,对同一电阻将产生同样的功率,至于零—峰值电压和峰—峰值电压,上面的说明就不适用了。因此,对功率来说,RMS 值是最有用的。

3. 微波测试常用参量

(1) 分贝(dB)

在射频微波产品的测试中,经常会碰到 dB、dBm 等量纲单位,有时用分贝(dB)表示电参量是一种比较方便的形式。

贝尔(Bel)是计量功率比值的一个单位,等于功率比值以 10 为底求对数,它是为了纪念电话发明者 Alexan-der Graham Ben 的杰出贡献而以其名字来命名的。分贝(decibel)是指两个功率比值以 10 为底取对数的 10 倍的量纲单位,记为 dB(正如用 mm 来代替 m 表示距离就需要将数值乘以 1 000),dB 是一个相对值量纲单位。

$$\alpha = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \quad \text{dB} \quad (1.5)$$

当用 dB 表示相关量纲单位时,会使数字的变化范围缩小,而且很多乘法和除法的运算就可以转变为加减运算,加减法运算相对乘除法要简单一些,这就是广泛采用 dB 相关量纲单位的原因。例如:功率范围从 100 W 变化至 1 mW,比值为 108:1,但用 dB 表示时该比值则只为 80 dB;两级功率放大器的增益分别为 12 倍和 16 倍,那么总增益应为 $12 \times 16 = 192$ 倍,如果换成对数来运算,第一和第二级功放的增益分别为 10.8 dB 和 12 dB,那么总增益为 $10.8 + 12 = 22.8$ dB。

需要指出的是一些特殊的数值要求大家熟记于心。例如:0 dB 对应的比值为 1(适于电压和功率二者),电路的增益或损失为 0 dB 时表明电路的输入等于输出。3 dB 对应功率比值为 2,功率电平变化 -3 dB,表明功率降至原来的 1/2;功率电平变化 +3 dB,表明功率增加 1 倍。6 dB 对应电压比为 2,电压变化 -6 dB,表明电压降至原先的 1/2;电压变化 +6 dB,表明电压增加 1 倍。10 dB 对应功率比为 10,这是唯一的一点,在这一点 dB 值和功率比值相同。

(2) 毫瓦分贝(dBm)

求一个功率值和一个固定的参考功率之比的对数值,就可以获得这个功率的对数表示值,通常使用的参考功率 P_2 为 1 mW,功率的对数值量纲单位是 dBm。

$$P = 10 \lg \frac{P_1}{1 \text{ mW}} \quad \text{dBm} \quad (1.6)$$

如果参考功率为 1 W,那么功率的对数值量纲就是 dBW。功率的对数值和相对值 dB 相加减意味着该功率增加或减小,因此量纲单位还是 dBm,只是数字上相加减。例如:5 dBm + 8 dBm = 13 dBm。如果功率变化 10 倍,对数值功率变化 10 dB,功率变化 1 倍,对数值功率变化 3 dB。

当计算多个信号的总功率时,即功率相加,不能直接用量纲单位 dBm 表示的对数值来计算,应该首先将对数值转换为线性值进行计算,再将计算后的线性值转换为对数值。例如:30 dBm 和 30 dBm 的信号功率相加就不是 60 dBm,而是 $1 \text{ W} + 1 \text{ W} = 2 \text{ W}$,转换为对数值后为 33 dBm。

(3) 常见的用 dB 相关量纲单位来表示的参数

① 增益或衰减

输出信号功率和输入信号功率之比,如果结果为正,则为增益,为负就是衰减,单位均为 dB。当多级系统的增益或衰减分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 时,每级系统的增益或衰减可用线性值表示为 $10(\frac{\alpha_1}{10}), 10(\frac{\alpha_2}{10}), \dots, 10(\frac{\alpha_n}{10})$,多级系统增益或衰减以 dB 为单位的对数值为

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n) \text{ dB} \quad (1.7)$$

② 信噪比 SN、信纳比 SINAD

信号功率与噪声功率的比值为信噪比 SN

$$SN = 10\lg\left(\frac{S}{N}\right) \text{ dB} \quad (1.8)$$

信号与噪声和失真信号功率之和的比值为信纳比 SINAD

$$SINAD = 10\lg\left(\frac{S}{N+D}\right) \text{ dB} \quad (1.9)$$

式中, S 、 N 、 D 分别表示有效信号、噪声信号、失真信号的功率。

③ 灵敏度

灵敏度是指设备或仪器接收微弱信号的能力,是在确保误比特率(BER)不超过某一特定值(通常取为 0.01)的情况下,设备或仪器能够有效反应的最小信号接收功率。雷达的灵敏度是制约其作用距离的决定性技术指标,雷达接收机的接收灵敏度可以按功率形式表示为 $P_{\min} = kTB N_f D$ 。其中: k 、 T 分别指玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)、热力学温度; B 表示接收机的通频带宽; N_f 表示接收机的噪声系数; D 表示接收机的噪声门限。

接收灵敏度也可以表示成对数形式

$$S_{\min}(\text{dBW}) = -204 \text{ dBW} + 10\lg BN_f D$$

当然还有许多其他可以用分贝(dB)表示的时域测量参数,这里不再一一枚举。

4. 脉冲信号测量参数

在无线电测量领域中,脉冲信号应用十分广泛,对脉冲信号参数测量也有着较高的要求。一般单个脉冲的特性可以用几个定量的指标加以描述,例如:脉冲幅度、脉冲宽度、过渡时间等。对周期性脉冲信号通常也要测量信号重复频率、占空比(开关比, on/off ratio)等。典型脉冲信号的波形图如图 1-2 所示。

脉冲宽度一般指脉冲前沿和后沿中点(50%幅度量值位置)之间的时间间隔(持续时间 duration),有时也称为固定沿脉冲宽度,图 1-2 中的脉冲宽度为 τ 。另外,也有以前沿起始拐角到后沿起始拐角之间的时间间隔来定义脉冲宽度的,称为可变脉冲宽度。

过渡时间通常指信号电平转换时所需的时间,主要包括**上升时间**(前沿过渡时间)与**下降时间**(后沿过渡时间)。上升时间一般指信号从脉冲幅度的 10% 过渡到 90% 所需要的时间,而下降时间一般指信号从脉冲幅度的 90% 下降到 10% 所需要的时间,图 1-2 中脉冲信号的上升时间与下降时间分别为 t_r 、 t_f 。

脉冲信号**重复频率**可以通过重复周期或重复频率加以描述,周期的倒数即为频率。周期性的连续脉冲波中两个波形相同点之间的时间间隔称为脉冲信号的周期。图 1-3 所示的周期性脉冲信号的重复周期为 T 。**占空比**一般指周期性脉冲序列中脉冲波形持续时间 T_1 与脉冲间隔时间 T_2 之比,如图 1-3 所示的占空比可以表示为

$$\text{占空比} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.10)$$

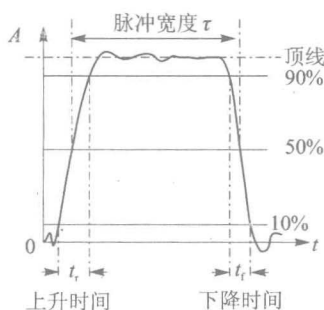


图 1-2 典型脉冲的波形图

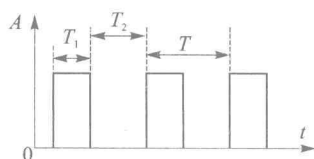


图 1-3 周期性脉冲序列

1.2.2 频域分析参数

信号测量主要从时域和频域 2 个方面进行。频域测量主要是观察信号幅度或能量与频率的关系,测量用的主要仪器为频谱分析仪。

频谱的特性是描述信号特征的一个重要方面,主要指信号的幅度谱与相位谱特性。

1. 幅频特性与相频特性

测量信号的幅频特性是指信号的幅度随频率的变化情况,相频特性则指信号的相位随频率的变化情况。

一般的常见信号 $f(t)$ 都可以通过傅里叶变换得到信号的幅频特性与相频特性。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1.11)$$

式中, $F(j\omega)$ 可反映出信号的幅度与相位随频率变化的情况。例如:对脉冲宽度为 τ 的门信号 $G(\tau)$ 有

$$f(t) = G_\tau(t) = \begin{cases} 1, & |t| < \tau/2 \\ 0, & |t| > \tau/2 \end{cases} \quad (1.12)$$

傅里叶变换可表述为

$$F(j\omega) = \tau \frac{\sin \omega\tau/2}{\omega\tau/2} = \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \quad (1.13)$$

则幅度特性与相频特性可由式(1.14)给出,波形如图 1-4、图 1-5 所示。

$$|F(j\omega)| = \tau \left| \frac{\sin \omega\tau/2}{\omega\tau/2} \right| \quad \varphi(\omega) = \begin{cases} 0, & \text{Sa}(\omega\tau/2) > 0 \\ \pi, & \text{Sa}(\omega\tau/2) < 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

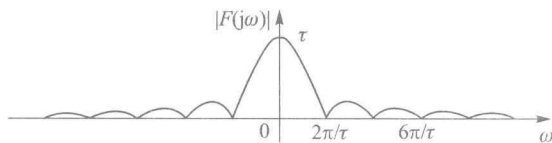


图 1-4 门信号的幅频特性波形图

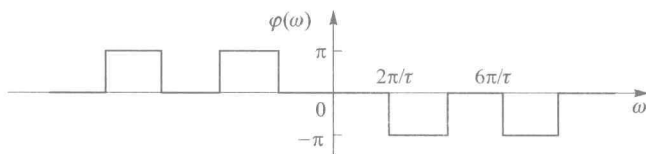


图 1-5 门信号的相频特性波形图

常见的频谱分析仪只能测量出信号幅频特性,一些能够完成傅里叶变换计算的频谱分析仪也

能完成对信号相频特性的显示测量。

2. 带 宽

信号带宽(band width)通常是指信号频谱的宽度,即:信号所包含的最高频率分量与最低频率分量之差。例如:一个方波信号最低频率为 2 kHz,最高频率为 14 kHz,则该信号的带宽为 12 kHz。对测量信号波形的仪器而言,该仪器对测量的信号通常有某种最大频率要求,超过它测量精度就会下降,这一频率就是仪表的带宽,通常以仪表灵敏度下降 3 dB 的频率点为准(有时也用 1 dB 和 6 dB 带宽)。信号带宽一般有以下 3 种计算方法。

① 以信号频谱最大幅度的 1/10 为限,如图 1-6(a)所示。

② 以信号振幅频谱中第 1 个过零点为限,如门信号的频带宽度为 $\frac{2\pi}{\tau}$ 。

③ 以包含信号总能量的 90% 处为限,如图 1-6(b)所示。

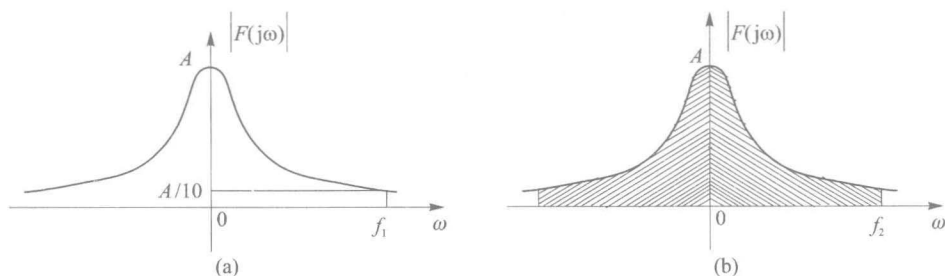


图 1-6 信号的带宽

对于一台标准的测量仪表,上升时间和带宽 B_w (3 dB 带宽,单位 Hz)之间的关系由式(1.15)决定

$$t_{\text{上升}} = \frac{0.35}{B_w} \quad (1.15)$$

这一关系式的真实性与仪表频率响应曲线的精确形状有关(即带宽以上频率下滑的速度)。对于单边下滑仪表这一关系式是精确的,对许多仪表都具有良好的近似式。仪表应有的上升时间应小于被测量信号的上升时间。测量上升时间使用的仪表,若上升时间小于被测上升时间的 2 倍,产生的误差约 10%;当仪表上升时间小于被测上升时间的 7 倍,误差可降到 1%。

思考题

1. 电子测量的基本概念、内容和方法是什么?
2. 时域测量与频域测量有什么异同?
3. 测量信号的带宽与测量仪器的带宽有什么关系?

第 2 章 常用的测量仪器

测量是人们借助于专门的设备,依据一定的理论,通过实验的方法将被测量与已知同类标准量进行比较而取得测量结果。测量仪器(仪表)是指将被测量转换成可直接观测的指示值或等效信息的器具,包括各种指针式仪器(仪表)、比较式仪器(仪表)、记录式仪器(仪表)以及传感器等。

2.1 电子测量仪器概述

电子测量仪器是指利用电子技术对各种信息进行测量的设备。

2.1.1 电子测量仪器分类

测量中用到的各种电子仪表、电子仪器及辅助设备统称为电子测量仪器。电子测量仪器种类繁多,主要包括通用仪器和专用仪器 2 大类。专用仪器是为特定目的专门设计制作的,适于特定对象的测量。通用仪器是指应用面广、灵活性好的测量仪器。

按照仪器功能,通用电子测量仪器分为以下几类:

1. 信号发生器(信号源)

信号发生器是在电子测量中提供符合一定技术要求的电信号产生仪器,例如:正弦信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器和随机信号发生器等。

2. 电压测量仪器

电压测量仪器是用于测量信号电压的仪器,例如:低频毫伏表、高频毫伏表和数字电压表等。

3. 示波器

示波器是用于显示信号波形的仪器,例如:通用示波器、取样示波器和记忆存储示波器等。

4. 频率测量仪器

频率测量仪器是用于测量信号频率、周期等的仪器,例如:指针式、数字式频率计等。

5. 电路参数测量仪器

电路参数测量仪器是用于测量电阻、电感和晶体管放大倍数等电路参数的仪器,例如:电桥、Q 表、晶体管特性图示仪等。

6. 信号分析仪器

信号分析仪器是用于测量信号非线性失真度、信号频谱特性等的仪器,例如:失真度测试仪、频谱分析仪等。

7. 模拟电路特性测试仪

模拟电路特性测试仪是用于分析模拟电路的幅频特性、噪声特性等的仪器,例如:扫频仪、噪声系数测试仪等。

8. 数字电路特性测试仪

数字电路特性测试仪是用于分析数字电路逻辑特性等的仪器,例如:逻辑分析仪、特征分析仪等,是数据域测量不可缺少的仪器。

测量时应根据测量要求,参考被测量与测量仪器的有关指标,结合现有测量条件及经济状况,尽量选用功能相符、使用方便的仪器。

2.1.2 电子测量仪器的主要技术指标

电子测量仪器的技术指标主要包括频率范围、准确度、量程与分辨力、稳定性与可靠性、环境条件、响应特性以及输入、输出特性等。

1. 频率范围

频率范围是指能保证仪器其他指标正常工作的有效频率范围。

2. 准确度

测量准确度又称为测量精度,它描述的是由于测量结果在测量过程中受各种因素影响而产生的与被测量真实值之间的差异程度,即测量误差。

测量准确度通常以允许误差或不确定度的形式给出。不确定度是指在对测量数据处理的过程中,为了避免丢失真实数据而人为扩大的测量误差。由于它在一定程度上能反映出测量数据的可信程度,因此而得名。不确定度的数值越大,丢失真实数据的可能性越小,即可信度越高。允许误差是为了描述测量仪器的测量准确度而规定的,利用仪器进行测量时,允许仪器产生的最大误差。

3. 量程与分辨力

量程是指测量仪器的测量范围。分辨力是指通过仪器所能直接反映出的被测量变化的最小值,即:指针式仪表刻度盘标尺上最小刻度代表的被测量大小或数字仪表最低位的“1”所表示的被测量大小。

同一仪器不同量程的分辨力不同,通常以仪器最小量程的分辨力(最高分辨力)作为仪器的分辨力。

4. 稳定性与可靠性

稳定性是指在一定的工作条件下,在规定时间内,仪器保持指示值或供给值不变的能力。可靠性是指仪器在规定的条件下,完成规定功能的可能性,是反映仪器是否耐用的一种综合性和统计性质量指标。

5. 环境条件

环境条件即保证测量仪器正常工作的工作环境,例如:基准工作条件、正常工作条件和额定工作条件等。

6. 响应特性

一般说来,仪器的响应特性是指输出的某个特征量与输入的某个特征量之间的响应关系或驱动量与被驱动量之间的关系。

目前,电子测量仪器已经逐步趋向多功能、集成化、数字化,随着新技术的发展,又进一步向自动化、系统化及智能化方向迅速发展。但是,我们应根据实际需要选择测试设备,设计测试方案时要考虑成本因素。在需要大量重复或快速测量的情况时,选择自动化仪器是合理的。