

TM 73
1082

152708

电力线载波机及电力线载波通道 测试技术

王金保 王治平 编



京电力大 00114083

中国电力出版社

内 容 提 要

本书比较系统地阐述了电力线载波通信测试原理与方法。书中包括：载波通道基本特性测试，电力载波通道传输质量，运行在 220kV 和 500kV 输电线上典型电力线载波机测试与调整，音频保护传输终端与电力线载波机联合特性测试，电力线高频通道测试。

本书在选材上具有一定的先进性、系统性和实用性。可供从事电力线载波通信和继电保护工作的技术人员使用，也可供大、中专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力线载波机及电力线载波通道测试技术/王金保，
王治平编. -北京：中国电力出版社，1995

ISBN 7-80125-015-X

I. 电… I. ①王…②王… II. 电力线载波通信
系统-载波机-通道-测试技术 N. TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 06785 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)
北京市地质矿产局印刷厂印刷
各地新华书店经售

1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷
787×1092 毫米 16 开本 11.125 印张 250 千字
印数 0001—2080 册 定价 11.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

电力线载波机和输电线高频载波通道构成了电力线载波通信系统，它是电力系统通信主要通信方式之一。随着我国改革开放不断深入，电力网得到飞速地发展，随之电力线载波机星罗棋布遍及全国各大小电网，乃至农村电网的电力载波通信也异军突起，势不可挡。当前，对于从事电力载波通信广大技术人员面临的共识问题，就是熟练地掌握电力线载波机和高频载波通道测试技术，从而提高设备的安装、运行维护水平，保证载波信息通道畅通无阻，为电网提供可靠和高质量的话音、远动和远方保护信息通路。诚然，这也是作者编写这本书奉献给同行的初衷。

本书是作者多年来从事电力线载波通信运行和管理，以及在教学过程中积累了丰富实践经验，以及理论与实践相结合的结晶。书中整个内容可分为三大部分：第一部分介绍载波通道特性参数、通道指标及其测试；第二部分介绍了电力线载波机和音频保护传输终端测试与调整；第三部分介绍了电力线高频载波通道的测试。全书内容力求真实、实用和系统，使读者能把精力集中于主要方面而不为枝节问题所困扰。

本书前五章内容已在现场和北京电力高等专科学校多次使用过，读者反映良好，这次又在原稿的基础上作了部分修改和补充，并且充实了新的内容。

本书共分七章。其中，第七章由王治平同志编写，其余各章由王金保同志编写，并由王金保同志统稿。本书特请华北电力集团公司调度局卢之堃高级工程师担任本书的主审，在编写过程中，还得到电力部国电通信中心、华北电力集团公司调度局、南京有线电厂、扬州电讯仪器 and 北京电力设备总厂等单位大力支持和合作，对此，谨致以诚挚的谢意。

在编写全书过程中，尽管作者力求正确无误，很不希望把谬误之处留给读者，但是，由于设备不断更新，编写者水平所限，书中难免出现错误和不妥之处，恳请与期待读者不吝予以批评指正。

编 者

1993. 9

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 测量误差	1
第二节 测量方法	5
第三节 载波通信测量仪表概述	7
第二章 载波通道部件基本特性及其测试	9
第一节 输入阻抗与输出阻抗及其测试	9
第二节 工作衰减与介入衰减及其测量	12
第三节 反射系数和回波衰减及其测试	16
第四节 平衡衰减及其测试	19
第五节 非线性失真系数及其测试	20
第六节 通路杂音及其测试	23
第七节 相位和群时延的测试	27
第八节 传输电平的测试	34
第三章 电力线载波通道传输质量	40
第一节 传输电平及净衰减	41
第二节 净衰减频率特性	43
第三节 通路振幅特性	45
第四节 通路稳定度	47
第五节 振铃边际	49
第六节 固有杂音	51
第七节 通路串音	51
第八节 载频同步	55
第九节 失真输出及其测试	56
第十节 选择性及其测试	59
第四章 ZDD-12 型电力线载波机测试与调整	61
第一节 概述	61
第二节 主要分盘测试与调整	67
第三节 单端机特性测试与调整	91
第四节 双端机特性测试与调整	100
第五节 自动交换系统的测试	109
第六节 音频转接通路特性测试与调整	112
第七节 远动信号复用与转接	113

第五章 ESB500 型电力线载波机测试与调整	116
第一节 概述	116
第二节 主要特性和技术指标	117
第三节 系统方框图及其信号传输过程	120
第四节 测试与调整	123
第五节 运动通道误码率测试	136
第六章 SWT400F6 型远方保护音频传输终端测试与调整	140
第一节 SWT400F6 型远方保护音频传输终端工作原理简介	140
第二节 SWT400F6 型远方保护音频传输终端主要技术指标	143
第三节 SWT400F6 型远方保护音频终端(宽带式)与 ESB500 型(E446) 电力线载波机联合特性测试与调整	145
第七章 电力线载波通道的测试	149
第一节 线路阻波器的测试	149
第二节 结合设备特性的测试	155
第三节 电力线载波通道特性的测试	162
参考文献	172

第一章 概 述

测试是人类对客观事物取得数量概念的认识过程，也是人们认识和改造自然的一种不可缺少的手段。在自然界中，对于任何被研究的对象，若要定量地分析和评价，必须通过测试手段来实现。例如，在科学实验和工业生产中，为了及时了解实验各种参量，生产过程的进程情况以及它们的最终结果，人们要经常对某些物理量，如电流、电压、功率、压力、流量、水位和温度等参数进行测试，观察其变化规律，并进行认真细致地分析，以便掌握和控制。在电力载波通信中，要定期而正确地测试传输信号各项参数并进行细致调整，才能保证载波通道信号传输特性符合标称值。

那么，什么是测试技术呢？它是指人们为了对自然现象能进行定性了解和定量掌握的所有技术措施。因此，测试技术应包括两个方面：第一是对物理现象进行定性了解；第二是对物理现象进行定量分析。

随着电子技术的发展，电子测试技术在科学实验和生产过程中起着巨大的作用，各项参数的测试都离不开电子测量，特别在通信技术领域，所有的传输信号各项参数的获得，都是通过电子仪器测量的。可以肯定，没有精确的电子测试仪器和正确的测试方法，则在通信设备的调整过程中就无科学依据。

近年来，电子计算机技术发展十分迅速。自 70 年代开始，相继出现了电子计算机与电子测试技术相结合的现代化测试系统和新型仪表。这样，就能在程序控制下，能迅速、自动而正确地对被测参量进行量程选择、数据记录及计算、某些误差的修正、越限处理，甚至还可进行事故追忆等。通常，把用微处理机与电子测量仪器相组合，构成具有一系列自动测试和运算功能的自动化测量仪表，称为“智能”仪表。目前，电力线载波通信的各项技术参数的测试正在向智能化方向发展。

随着科学技术的发展和现代化生产的需要，测试技术已经成为一门发展迅速、应用广泛和精确度愈来愈高的独立学科。测试技术这门技术学科所涉及的内容是极其广泛的，学习和掌握了测试技术，就能够在生产中，正确地选择测试方法，以及正确地选择测试仪表，从而有效而准确地完成各项测试工作。

本书着重介绍电力线载波通路信号传输特性，以及这些特性的测试原理和方法。

第一节 测 量 误 差

一、概述

测量是人们借助于专用仪器仪表，确定被测设备特性的全部实验过程。

通常，测量结果的量值由两部分组成，即数值（大小和符号）和相应的单位名称。数值既可以表现为一定的数字，也可能表现为一条曲线或显示某种图形（同样也包含具体的

数值与单位)。必须注意,测量结果的数值后面要注明单位,否则量值是没有物理意义的。

由于在测量过程中,受到各种因素的影响,其测量结果中不可避免地存在着误差。为了说明测量结果的可信赖程度,因此在表示测量结果时,还必须同时标注出测量误差或范围。

二、测量误差

一个被测量,其本身所具有的大小,一般称为真值。真值是一个理想的物理概念,是人们在测量时力求期望要达到的数值。

在测量过程中,由于人们对客观认识的局限性、测试仪表精度不高、测量手段不完善,或受到测量环境影响和测量时考虑不周等原因,都会导致测量结果与被测量的真值有所差异。通常,我们把这个在测量中的数量上的差异称为误差。随着科学技术的发展,人们对于测量精度提出更新更高的要求,因此在实测过程中要尽量控制和减小测量误差,使其测量数值接近于被测量的真值。

测量误差按表示方法分为绝对误差和相对误差;按误差来源分为仪表误差、人身误差、影响误差和方法误差等;按误差的性质分为系统误差、随机误差和疏失误差。

1. 绝对误差

由测量所得到的被测量值 x 与其真值 A_0 的差值 Δx ,称为绝对误差。因此绝对误差表示为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1-1)$$

当 $x > A_0$ 时, Δx 是正值;当 $x < A_0$ 时, Δx 是负值。所以 Δx 是具有大小、正负和有量纲的数值。它的大小和正、负号分别表示测得量与真值之间偏移程度和方向。

式 (1-1-1) 中的 A_0 表示被测量的真值,对于测量者来说,不管用任何测量手段,都测不出来的,而只能尽量接近此值。因此,在测量学科中,用人们公认高级仪表所测得的数值代替真值。为了区别起见,一般用满足规定的准确度代替被测量真值所使用的量值定为实际值,用 A 来表示。这时绝对误差可写为

$$\Delta x = x - A \quad (1-1-2)$$

这是通常使用的表达式,又称示值误差。

绝对值与 Δx 相等但符号刚好相反的值,称为修正值,一般用 C 来表示。

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1-1-3)$$

在测量时,利用被测得值 x 与已知的修正值 C 相加,即可计算出被测量的实际值 A 。

有时修正值给出的不一定是具体的数值,也可以是一条曲线或数值表。

2. 相对误差

绝对误差只能说明测得量值偏离实际值的程度,但是不能表征测量的准确程度。为了表征这一特点,应当采用相对误差。

(1) 实际相对误差可用测量时得到的绝对误差与被测量的实际值之比(用百分数表示)来表示相对误差,并记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{x - A}{A} \times 100\% \quad (1-1-4)$$

由上式可见,用相对误差可以恰如其分地表征测量的准确度。相对误差是一个只有大小和符号,而无量纲的数值。

(2) 示值相对误差是指在绝对误差较小、要求不太严格的场合下,可用仪器测得被测量值 x 代替实际值,这时的相对误差称为示值相对误差,即用绝对误差与仪表的示值 x 之比的百分数,并记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% = \frac{x - A}{x} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

(3) 满度(或称引用)相对误差是指绝对误差与仪表的满刻度值之比的百分数,并记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-1-6)$$

式中 x_m ——仪表的满度值。

由于 γ_m 是用绝对误差 Δx 与一个常数 x_m (量程上限) 之比值来表示的,因此,给出的是绝对误差大小。通常电工仪表正是按 γ_m 值来进行分级的,例如 1.5 级仪表,是表明 $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$,并在仪表面板上标有 1.5 的符号。

为了减少测量中的示值误差,在选择量程时应使指针尽可能接近于满度值。一般情况下最好能工作在不小于满度值三分之二以上的区域。

(4) 用分贝(dB)表示的相对误差。用对数表示的误差称为分贝误差,常用于表示测试被测网络的增益或衰减信号传输电平值。

例如一个放大器放大倍数为 K_v ,则放大器增益分贝值为

$$G_x = 20\lg K_v \quad (\text{dB}) \quad (1-1-7)$$

式中 K_v ——表示放大器输出电压 U_o 与输入电压 U_i 之比。

又因 $K_v = K + \Delta K$

式中 K ——放大器放大倍数的标称值;

ΔK ——放大器放大倍数偏移量。

则

$$\begin{aligned} G_x &= 20\lg(K + \Delta K) = 20\lg\left[K\left(1 + \frac{\Delta K}{K}\right)\right] \\ &= 20\lg K + 20\lg\left(1 + \frac{\Delta K}{K}\right) = 20\lg K + 20\lg(1 + \gamma_A) \end{aligned} \quad (1-1-8)$$

式中 $\gamma_A = \Delta K/K$

所以 $G_x = G + 20\lg(1 + \gamma_A) \quad (1-1-9)$

式中 $G = 20\lg(1 + \gamma_A)$ ——增益的实际值;

$20\lg(1 + \gamma_A)$ ——增益的误差值。

对于电压、电流增益误差值可用以下通用公式表示

$$\gamma_{ab} = 20\lg\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right) = 20\lg(1 + \gamma_x) \quad (\text{dB}) \quad (1-1-10)$$

对于功率增益误差值可表示为

$$\gamma_{dB} = 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) = 10 \lg(1 + \gamma_r) \quad (\text{dB}) \quad (1-1-11)$$

由上所述,被测量所测得值的相对误差愈小,则表明它的准确度愈高。因此评价测量水平时应当用相对误差来进行比较,它是测量误差计算中最常用的一种表达形式。

三、测量误差产生的原因

众所周知,测量误差是指用测量仪表进行测量时,所得到的数值与被测量的实际值之差。误差产生的原因是由于测量仪表误差以及测量辅助设备、测量方法、外界环境、操作技术等因素共同作用的结果。

1. 仪表误差

仪表误差主要是由于仪表本身的电气特性或机械性能不良而产生的,它包含有仪表的校准误差、仪表刻度误差、读数分辨率不高所引起的误差、仪表内部噪声引起的误差,以及仪表稳定度不高和动态特性不佳而造成的误差等等。

2. 操作误差

操作误差一般是指在使用仪表过程中,由于安装、调节、布置和使用不当所导致的误差。例如把规定垂直安放的仪表水平放置了;测试接线太长或未考虑阻抗匹配;接地不良或未将被测设备与仪器共地;未按仪表规定操作说明进行预热、调节和校准等都会引起操作误差。

减小和消除操作误差的方法是严格按仪表操作规定使用,并且要提高实验技巧和分析发生异常现象的能力。

3. 人身误差

人身误差是指由于人的感觉器官灵敏度有所差异而引起的误差。例如,某些测量仪表是借助于人耳或眼得到测量结果的,因此测量误差将会因人而异。

提高测量操作技巧和改进测量方法均可有效减小人身误差。

4. 影响误差

影响误差又称环境误差。它是指测量仪表受到外界温度、湿度、气压、电磁场、机械震动、声音、光照和放射性等因素所致而产生的误差。例如,通信设备测试仪表在使用时对使用范围和环境有明确规定,就温度范围而言,不同仪表可规定为 $+10 \sim +35^\circ\text{C}$ 、 $-10 \sim +40^\circ\text{C}$ 、 $-40 \sim +55^\circ\text{C}$ 。因此,测量仪表必须在规定的额定使用范围内工作,方能保证各项技术指标测试的准确性。

5. 方法误差

方法误差有时也称理论误差。它是由于测量时所使用的方法不完善,所依据的理论有偏差,或对某些经典的测量方法作不当简化或修改等原因而造成的误差。例如测量任意波形电压的有效值,理论上应该实现完整的均方根变换,但是通常都是以折线近似代替真实曲线进行变换的,因此理论上就产生了误差。

误差又可按其规律性分为以下三种:

(1) 系统误差。系统误差是指对同一个物理量进行多次重复测量时,如果出现的误差是按照已知的函数变化规律变化,或在一定条件下其误差的数值是一个恒定数值。

在整个测量过程中,数值及符号都保持不变的系统误差通常称为定值误差,例如,当用选频电平表测量信号电平时,由于测试前未对宽频测量或选频测量进行校准,致使测量信号传输电平时出现读数偏高或偏低的现象。反之,数值及符号的变化具有一定规律性的系统误差称为变值误差。

系统误差有时被人们所疏忽,它能严重地影响测量准确度。因此,在测量之前,应认真仔细检查所有可能产生系统误差的来源,并加以消除之,或设法决定其大小加以修正。

(2) 随机误差。随机误差亦称偶然误差。随机误差的特点是它的出现带有偶然性,即它的数值大小和符号都不固定,但是它在一定的条件下服从统计规律、呈现正态分布。引起随机误差的原因一般都是微小的因素且很难控制。要减小随机误差的影响可以通过多次反复测量求取平均值或利用概率统计理论中的有关原理和处理方法对所测数据进行修正处理。

(3) 疏失误差。疏失误差的产生是由于测量者在测量时疏忽大意而造成的,例如,仪表的指示数值被读错、记录时有误、仪表操作有错误以及计算错误等。疏失误差的数值一般都比较大且无规律性。

综上所述,为了提高测量精确度,使测量的误差尽可能减小。为此应做到:

(1) 在进行测量之前,务必对测量仪表及测量方法作过细的考察,使不应有的或可以避免的系统误差尽可能在进行测量之前加以消除;

(2) 在测量过程中,根据实际需要采用不同方法,以减小不可避免的系统误差;

(3) 在测量中发现某次测量结果所对应的误差特别大时,应通过理论分析,增加测量次数或重新进行测量,或改变测量环境和测试人员,或利用统计等方法使测试结果正确无误。

第二节 测 量 方 法

一个物理量的测量,可以通过不同的方法来实现。最基本的测量方法有直接测量、间接测量和组合测量法。

一、测量方法的分类

1. 直接测量法

直接测量法是指对于使用仪表测量被测量时,无需经过对被测的量与其它实测的量进行函数关系的辅助运算,而直接得到被测量值的测量方法。例如,用电压表测量电压,用数字频率计测量频率等。用直接测量法显著特点是测量过程简单而迅速,但也存在测量精度不高的缺点。一般情况下,直接测量方法用于工程测量。

2. 间接测量法

间接测量法是利用直接测量的量与被测量的量之间已知的函数关系,或用计算公式进行计算,或用曲线和表格查找,求出被测量数值,通常称这类测量方法为间接测量。例如,载波机的外线输出功率 $P=UI=U^2/R$, 外线负载阻抗为 75Ω , 只要测出外线载波信号电压

U ,即可求出外线输出功率 P ,或根据绝对功率电平公式 $p=10\lg\frac{P}{1\text{mW}}$ 进而求得外线输出电平了。

当被测量不便于直接测量,或者间接测量的结果比直接测量更为准确时,一般宜采用间接测量方法。

3. 组合测量法

组合测量法是指直接测量与间接测量混合的测量方法。它是将被测量和另外几个量组成联立方程,通过直接测出这几个量,最后根据联立方程进行求解,从而得出被测量的大小。目前大都采用计算机编制计算程序求解,不但测量结果精确,而且比较简便。

测量方法可分为自动测量和非自动测量,当地测量和远距离测量等。按测量精度来区分,有精密测量与工程测量两大类。前者多用在计量室或实验室,去分析和研究测量误差;后者虽要分析测量结果误差大小,但不需精确,其选用的仪器仪表准确度等级已能满足工程实际要求的需要。

二、选择测量方法的准则

在选择测量方法时,应首先研究被测量本身的特性参数,所需要的精确程度、环境条件及所具有的测量设备等因素,综合分析后,再确定采用哪种测量方法和选择哪些测量设备。

正确的测量方法,一定会得到精确的测量结果。长期积累设备运行正确的测试数据,为分析和处理故障提供充分的依据,否则一定会出现下列现象:

- (1) 得出的测量数据是错误的,无参考价值,不可信赖;
- (2) 损坏测量设备仪器、仪表;
- (3) 损坏被测设备或元器件,影响设备正常运行。

下面举例说明由于测量方法不正确而导致测量结果是错误的或损坏设备的情况。

例 1-1 用 PS-10 型数字式频率计测量一个振荡电路的谐振频率,如图 1-2-1 所示。

解:该频率计的测量范围为 10Hz~200MHz,如果被测量频率约为 1MHz 时,以取样时间为 1s,其准确度可达 $\pm 10^{-6}$ 量级。可见,测量 1MHz 时误差只有 $\pm 1\text{Hz}$ 。

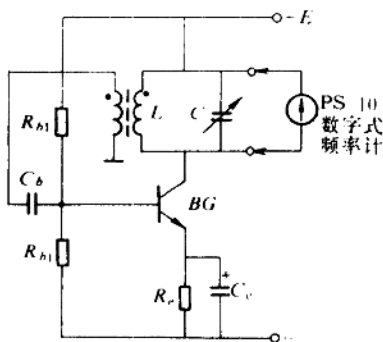


图 1-2-1 用频率计直接测量振荡频率

但是,由于 PS-10 型频率计的输入阻抗仅为 50 Ω ,将频率计直接与谐振回路并联后,严重影响了频率计的频率稳定度,甚至会导致振荡器停振而无法测量。

例 1-2 用 YX501 型选频电平表测量某型号电力线载波机“外线”输出电平值,如图 1-2-1 所示。

解:设载波机“外线”输出阻抗为 75 Ω ,输出功率电平值为 +33dBm。

通常选频电平表指示电平值均为电压电平。但是在测试“外线”输出电平时,有时误

认为选频电平表的指示电平值就是电平图中标出的标称电平值，致使调整时将外线电平值提高了 6dB，即相当于“外线”输出功率提高了 4 倍。这将引起“外线”所接的等效负载电阻烧坏，功放盘内放大器件温度升高，甚至会损坏。

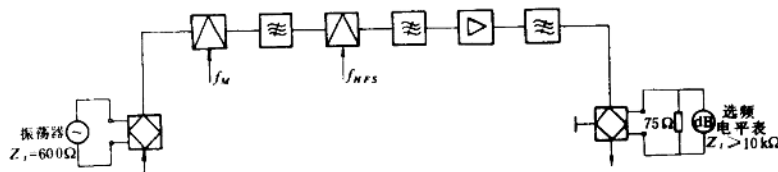


图 1-2-2 载波机“外线”输出电平测试图

由上二例可见，欲使测量结果准确，必须使测量方法与测试仪器和仪表相配合。因此，正确的选择测量方法、仪表以及编制测试程序是极其重要的。

第三节 载波通信测量仪表概述

测试仪表（仪器）是指把被测量通过变换成可直接观测的指示值或等效信息的设备。它可包括指示式仪表（仪器）、比较式仪表（仪器）和记录式仪表（仪器）等。载波通信设备测试仪表是采用电子技术对被测通信设备被测量进行变换和处理，最终便于人们观察和记录通信设备各项参数。

一、发展历史

众所周知，电工仪表具有简单、小型和方便等特点，但是它的灵敏度低、内阻小、频率范围窄，因而它不适用于通信参数的测量。

20 年代发展起来的电子管仪表，由于采用了放大技术，使灵敏度、内阻和频响均提高很多倍，但体积大，耗电量高。到 50 年代广泛应用了晶体管仪表，使体积、重量和耗电都大为减小，但是多数为指针式仪表，存在着测量精度低、误差大和速度低的弊病。

到 70 年代发展起来的由集成电路构成的数字化仪表，以数字显示代替了指针偏转，从而提高了速度，精度，减小了体积，读值一目了然。

80 年代将微处理器和测试技术相结合之后，测试仪表进入了崭新的时代，它逐步发展成为多功能化、高度集成化和数字化。

二、载波通信仪表分类

载波通信测试仪表品种繁多，大致可按以下情况分类。

按测试仪表工作原理分为模拟式和数字式，或两者相结合型。模拟式仪表是指具有连续特性并与同类模拟量相比较的仪表（如电子示波器、毫伏表等）；而数字式仪表是指通过模数转换，把具有连续特性的被测量转换成数字量，并且通过处理和显示器显示被测结果（如数字频率计等）。

按测试功能分，可分为专用仪表与通用仪表。专用仪表是为特定用途而设计的，适用

特定的测试对象，使用方便。而通用仪表的应用面广，灵活性强，但造价高。具体分类如下：

1. 电平测试仪表

电平测试仪表有电子式电压表、毫伏表、数字式电压表以及选频电平表等。

2. 电路参数测试仪表

电路参数测试仪表有阻抗电桥、品质因素表、晶体管或集成电路参数测试仪等。

3. 频率、时间和相位测试仪表

频率、时间和相位测试仪表有数字式频率计、相位计和波长表等。

4. 波形测试仪表

波形测试仪表有通用示波器，多踪示波器、记忆示波器和数字存贮示波器等。

5. 信号分析测试仪表

信号分析测试仪表有失真仪、谐波分析仪和频谱分析仪等。

6. 通路特性测试仪表

通路特性测试仪表有扫频仪、噪声计等。

7. 测试信号源仪表

测试信号源仪表有高低频信号发生器、载频振荡器、脉冲和噪声信号发生器等。

第二章 载波通道部件基本特性及其测试

第一节 输入阻抗与输出阻抗及其测试

输入阻抗是指一个四端网络的输入端接入信号源 E_1 , 输出端接负载 Z_2 , 在其输入端测得电压 U_1 与电流 I_1 的比值。而输出阻抗是指在四端网络输出端接信号源 E_2 , 输入端终接负载 Z_1 , 在输出端测得电压 U_2 与电流 I_2 之比值。表征四端网络输入阻抗和输出阻抗示意图如图 2-1-1 所示。

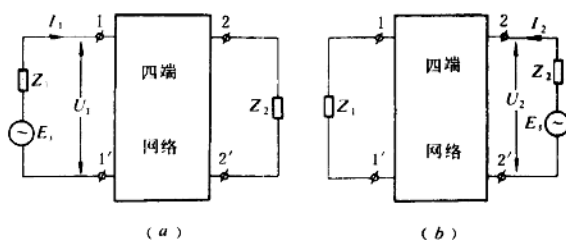


图 2-1-1 四端网络阻抗示意图

(a) 输入阻抗; (b) 输出阻抗

四端网络输入阻抗 Z_i 的表达式为

$$Z_i = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = |Z_i| e^{j\varphi_1} \quad (2-1-1)$$

式中 φ_1 —— $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_1$ 之间的相位差。

四端网络输出阻抗 Z_o 表达式为

$$Z_o = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = |Z_o| e^{j\varphi_2} \quad (2-1-2)$$

式中 φ_2 —— $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 之间的相位差。

在载波通道四端网络测试中, 以测试输入阻抗和输出阻抗较为普遍。网络阻抗的测试都是指被测网络阻抗的模值和阻抗相角 φ 。现分别介绍其测试方法。

一、阻抗测试

1. 伏安法测试阻抗

用伏安法测量阻抗原理如图 2-1-2 所示。

根据阻抗定义, 可通过测量被测网络或电路两端点间的电压和流过两点间电流来求得阻抗大小, 这里电压和电流均取有效值。具体测试接线图如图 2-1-2 所示。由测试电路可见,

为了减小测量阻抗的误差，图中的电流表应选用内阻小的表（一般采用高频电流表），电压表应选用内阻高的表。

在电力载波通信测试中，往往没有合适的高频电流表，所以通常采用图 2-1-2 (c) 所示的测量电路。在被测电路中串接一只已知阻值的测量电阻 R （亦称电流取样电阻），为了减小取样电阻对被测电路的影响，因此要求其阻值 R 应远小于 $|Z|$ 。例如， R 可选为 1Ω 、 10Ω 或 100Ω 等数值，以便于进行测量计算。根据电压表 V_2 测出取样电阻 R 两端电压为 U_2 ，由公式 $I=U_2/R$ ，进而求得被测阻抗 $|Z|$ 。则

$$|Z| = \frac{U_1}{I} = \frac{U_1}{U_2} \cdot R \quad (2-1-3)$$

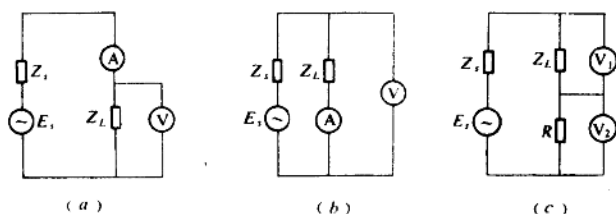


图 2-1-2 用伏安法测量阻抗

(a) 测低阻抗；(b) 测高阻抗；(c) 用电压表测阻抗

E_1 —信号源； Z_1 —信号源内阻； Z_L —被测阻抗

如果要求测量 $|Z| \sim f$ 值，即阻抗模值随频率变化之间的关系，在测试前可在电路工作频带内选择若干个频率点，然后改变频率，依次测出每一个频率点上的 $|Z|$ 值，再根据所测的数值在直角坐标系上画出 $|Z| \sim f$ 曲线，即可得到被测电路的阻抗频率特性曲线。在测试过程中，要保持信号源输出信号电压不变。

2. 用换算法测量输入阻抗

测量输入阻抗原理接线图如图 2-1-3 所示，其测试方法如下：

使被测电路处于工作状态下，在被测电路的输入回路中串接一个取样电阻 R ， R 的取值

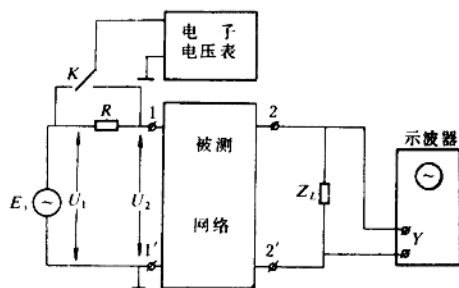


图 2-1-3 输入阻抗测量电路

宜与输入阻抗同一个数量级，信号发生器内阻应为零。然后调节信号发生器输出频率和电平，使其工作频率和电平范围符合电路规定，电路输出端应接实际负载 Z_L ，并用电子示波器观察其输出信号波形，要求在输出波形不失真的情况下才能用高内阻电子电压表测量取样电阻 R 两端的对地电压 U_1 和 U_2 ，最后根据下面的计算公式求得电路输入阻抗，则被测电路输入电流 I_i 为

$$I_i = \frac{U_R}{R} = \frac{U_1 - U_2}{R}$$

因此, 输入阻抗 $|Z_i|$ 为

$$|Z_i| = \frac{U_2}{I_i} = \frac{U_2}{U_1 - U_2} \cdot R \quad (2-1-4)$$

测量电路的输入阻抗亦可采用“半电压法”。这时把测量电路中的取样电阻 R 改用电阻箱, 测量时, 电子电压表应先接“1”端, 调节电阻箱 R 并使其阻值为零, 尔后调节输入信号幅度达到规定值 (信号发生器内阻应为零), 并测量其电压值; 再调节 R , 使输入被测电路的信号电压为规定值的一半, 则 $U_2 = U_1/2$ 。因此, 输入阻抗为

$$|Z_i| = \frac{U_2}{U_1 - U_2} \cdot R = \frac{U_1/2}{U_1 - U_1/2} \cdot R = R \quad (2-1-5)$$

由式 (2-1-5) 可见, 电路输入阻抗等于电阻箱的读出值。如果测量时无电阻箱亦可用电位器代替, 不过要用电桥先测量出电位器阻值。

这里要特别指出, 当测量限幅器或放大器的输入阻抗时, 输入信号电平不能太高, 以免超过被测网络的线性工作范围, 而造成输入阻抗变化导致测量产生不必要的误差。

3. 用换算法测量输出阻抗

测量输出阻抗原理接线图如图 2-1-4 所示, 其测试方法如下:

测试输出阻抗时, 应使电路处在工作状态, 被测电路输出先不接负载 Z_L 。然后调节信号源 E_s , 使其输出信号频率和电平值符合被测电路规定要求, 用示波器观察电路输出波形, 要求波形在不失真的情况下才能进行测量。首先用电子电压表测出输出端负载开路时的电压 U_0 , 尔后, 接上负载 Z_L 并记下电子电压表的读数 U_L 。则

$$U_L = \frac{U_0}{Z_0 + Z_L} \cdot Z_L \quad (2-1-6)$$

式中 Z_0 ——被测电路输出阻抗。

由式 (2-1-6) 可计算输出阻抗 Z_0

$$Z_0 = \left(\frac{U_0}{U_L} - 1 \right) Z_L \quad (2-1-7)$$

如果将测量电路中的 Z_L 采用可变电阻箱时, 也可采用“半电压法”测量电路输出阻抗。测量时, 先测量输出负载开路电压 U_0 , 尔后接 Z_L , 并且调节可变电阻箱使电子电压表的读数 $U_L = U_0/2$, 则

$$Z_0 = \left(\frac{U_0}{U_L} - 1 \right) Z_L = \left(\frac{U_0}{U_0/2} - 1 \right) Z_L = Z_L \quad (2-1-8)$$

由式 (2-1-8) 可见, 被测电路的输出阻抗就等于可变电阻箱的读数。

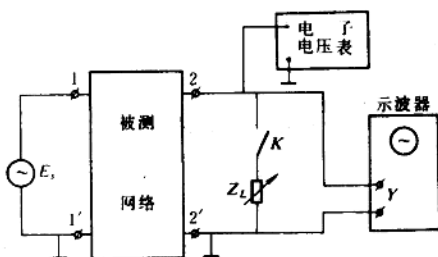


图 2-1-4 测量输出阻抗示意图

这里要着重提及的四端网络特性阻抗测量问题。众所周知，无源四端网络的特性阻抗 Z_0 等于它的短路阻抗和开路阻抗乘积的开平方，即 $Z_0 = \sqrt{Z_{sc} Z_{oc}}$ 。我们可以运用测试电路输入阻抗的方法，测量电路的短路阻抗和开路阻抗，然后再用公式计算电路特性阻抗 Z_0 。有时，当无源四端网络的衰减超出 14~18dB 时，则它的输入阻抗实际上可视为与负载阻抗大小无关，而等于它的特性阻抗。

二、阻抗相角 φ 的测量

输入阻抗和输出阻抗的相角等于被测网络的输入端或输出端电压相位 φ_u 与其电流相位 φ_i 的相位差，即 $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ 。

阻抗相角 φ 的测试可采用图 2-1-5 所示电路来完成，其测试方法如下：

由图 2-1-5 (a) 可见， Y_1 输入电压是输入阻抗上的电压， Y_2 是输入电压与输入阻抗上流过的电流 I 同相。在双踪示波器屏幕上显示的两条正弦波形如图 2-1-5 (b) 所示，很显然，被测阻抗相位角为

$$\varphi = \frac{d}{D} \times 360^\circ \quad (2-1-9)$$

图 2-1-5 (a) 中的 R 是反映电流相位的取样电阻，但取值不宜过大。另外，这种测量阻抗相角方法，由于屏幕上对 D 和 d 长度的读数误差较大，因此这种测量只是近似的，如果要进行较精确的测量可以用数字式相位计测量阻抗相角。

根据示波器上显示波形观察，如果 u 超前 i ，这表明被测网络的阻抗呈现感性；反之， u 滞后 i ，则被测网络阻抗为容性阻抗。图 2-1-5 显示 u 和 i 波形可知， u 滞后于 i 这说明输入阻抗呈容性。

改变信号源的输出信号频率，可以测量不同信号频率下的阻抗相角 φ ，并由此得到 $\varphi-f$ 阻抗频率特性曲线。

第二节 工作衰减与介入衰减及其测量

衡量四端网络的衰减，主要有工作衰减、介入衰减、固有衰减和传输衰减。在测试载波通信设备时，比较常用的是工作衰减和介入衰减，其中又以工作衰减为测试载波设备中四端网络所经常采用。

一、工作衰减

工作衰减是指把等于信号源内阻的负载 Z_L 直接与信号源连接，这时信号源供给负载

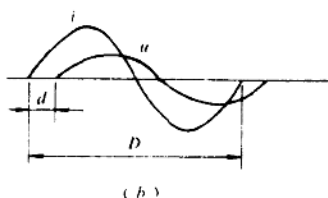
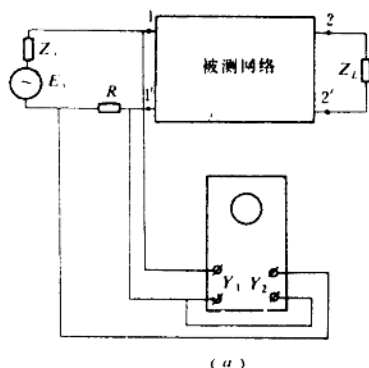


图 2-1-5 双踪示波器测量阻抗相角

(a) 输入阻抗相位角测试；

(b) 电压电流波形图