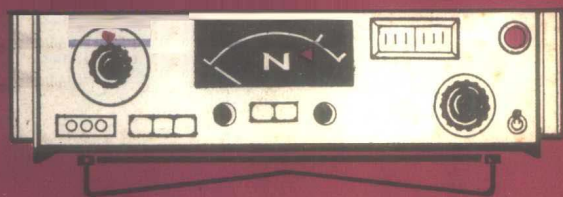


电平测试仪器

北方交通大学电信信号工厂编



人民铁道出版社

电 平 测 试 仪 器

北方交通大学电信信号工厂编

1 9 7 7 年 · 北 京

内 容 提 要

本书比较系统地阐述了电平测试仪器的的工作原理和主要问题，并结合典型产品，详细介绍了电平振荡器和选频电平表的组成以及各单元电路的工作原理，对具有频率锁定的电平测试仪器，本书作了重点介绍。本书还对电平测试仪器的使用方法和检测作了具体介绍。

本书共分六章：第一章概述；第二章电平振荡器；第三章频率合成；第四章频率锁定振荡器；第五章选频电平表；第六章电平测试仪器的使用与检测。

本书内容通俗易懂，可供铁路通信工厂、载波室、研制和维修单位的工人、技术人员参阅，也可供大专院校有关专业的师生参考。

电 平 测 试 仪 器

北方交通大学电信信号工厂编

人民铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：8.375 插页：3 字数：182 千

1977年7月 第1版

1977年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001—10,000册 定价(科二)：0.60元

毛 主 席 语 录

阶级斗争是纲，其余都是目。

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

前 言

随着生产和科学技术的迅速发展，各种电子测量仪器在铁路通信信号中越来越被广泛应用。目前已成为通信信号工厂、科研部门、试验单位以及电务设备维修工作中不可缺少的测量工具。

为了使铁路电务职工了解电子测量仪器的基本知识、使用方法及其维修技术，更好地发挥仪器的作用，我们将陆续编写几本这方面的书（例如，通用计数器、电平测试仪器、图示测试仪器、电子示波器等），以适应现场需要。

本书比较系统地阐述了电平测试仪器的工作原理和主要问题，并结合典型产品，详细介绍了电平振荡器和选频电平表的组成以及各单元电路的工作原理，对具有频率锁定的电平测试仪器，本书作了重点介绍。本书还对电平测试仪器的使用方法和检测作了具体介绍。

本书在编写过程中，得到很多有关单位的支持和帮助，我们在此表示衷心的感谢。但由于我们水平有限，书中谬误之处一定不少，希望广大读者给予批评指正。

北方交通大学电信信号工厂

一九七六年九月

目 录

第一章 概述	1
1.1 对电平测试仪器的要求	1
1.2 关于频率	2
1.3 关于电平	4
1.4 电平测试仪器的的工作原理	8
第二章 电平振荡器	11
2.1 电平振荡器的主要指标	11
2.2 300千赫电平振荡器的总体组成	17
2.3 振荡单元	22
2.4 调制与低通滤波单元	32
2.5 电平放大单元	43
2.6 输出电路	50
第三章 频率合成	65
3.1 概述	65
3.2 锁相环的基本概念	69
3.3 普通锁相环与正弦鉴相器	79
3.4 倍频式锁相环	88
3.5 压控振荡器	103
第四章 频率锁定振荡器	110
4.1 频率合成单元	110
4.2 自动稳幅电路	122
4.3 典型产品介绍	128
第五章 选频电平表	154
5.1 选频电平表的主要指标	154

5.2 选频电平表的总体组成·····	157
5.3 选频电平表的主体电路·····	164
5.4 电平校准·····	194
5.5 电压电平与功率电平转换·····	203
5.6 标准电平表·····	207
5.7 典型产品介绍·····	214
第六章 电平测试仪器的使用与检测·····	230
6.1 电平测试仪器的使用·····	230
6.2 电平测试仪器的检测·····	248

第一章 概 述

载波通信测试仪器大致可分为两类：一类是载波设备及传输测试仪器；另一类是线路专用测试仪器。选频电平表、电平振荡器、电平图示器以及各种综合传输测试仪器属于第一类，通称电平测试仪器；脉冲反射测试仪、串音测试仪以及杂音测试仪等属于第二类。本书，主要介绍电平振荡器和选频电平表的工作原理和使用方法。

1.1 对电平测试仪器的要求

载波通信的发展经历了明线、对称电缆、同轴电缆三个阶段；通话路数由3路、12路、60路发展到2700路、3600路乃至10800路。传输系统所容纳的传输通路越多，意味着传输频带越宽，表1—1列出了载波传输频带的展宽情况。

选频电平表和电平振荡器是用来研制、生产和维护载波通信设备及其部件所必不可少的基本电平测试仪器。随着载波传输系统所容纳的传输通路越来越多以及对通信质量的要求越来越高，必然对电平测试仪器提出新的要求。

除了电平测试仪器的频率范围必须适应日益发展的多路载波通信的需要外，对仪器的测量准确度和灵敏度也提出了严格的要求。此外，还要求仪器具有更高的可靠性，并简化仪器的操作程序，以便保证测试工作的进行达到多、快、好、省。通信信号是铁路运输的耳目，可以设想，如果测试设备的工作不可靠，或者操作太花时间，以致不能在最短的时间内消除传输系统上出现的故障，则将对铁路运输带来很大的损失。

载波系统的频率范围

表 1—1

	1KHz	10	100	1MHz	10	100
12路	12KHz		162KHz			
60路	12KHz		252KHz			
120路	12KHz		552KHz			
300路	60KHz		1.3MHz			
960路	60KHz		4.028MHz			
1800路	314KHz		8MHz			
2700路	314KHz		12.4MHz			
3600路	314KHz		18MHz			
10800路	4.332MHz		59.684MHz			

什么是表征电平测试仪器性能的最简便的方式呢？对电平振荡器来说，必须能够迅速而可靠地调整到一个预定的已知频率上，并提供已知的信号电平（振幅）；而对选频电平表来说则应有足够准确地确定包含在整个频谱内的信号的未知频率，并以很高的分辨能力和准确度来测出信号的未知电平。因此，评价一个电平测试仪器性能的好坏，主要可归结为频率和电平两个主要参数。下面分别来加以介绍。

1.2 关于频率

在电平测试仪器中，不论是电平振荡器的输出信号，或是选频电平表的被测信号，一般都是正弦波。正弦波的一个重要参数就是频率，即交变信号每秒变化的次数。在电平测试仪器中，对频率提出了严格的要求，特别是电平振荡器。我们用频率准确度来表明仪器所能提供的频率的准确程度，

频率准确度的定量表示是指仪器的实际输出频率偏离标称频率的量值，一般可用频率的绝对偏离或相对偏离两种表示法：

$$\Delta f = f - f_0 \text{ 或 } \frac{\Delta f}{f_0}$$

式中 Δf ——频率绝对偏离，又叫绝对误差；

f ——频率实际值；

f_0 ——频率标称值；

$\frac{\Delta f}{f_0}$ ——频率相对偏离，又叫相对误差。

在经过一个很长的发展阶段之后，电平测试仪器的频率准确度，从三十年代只能达到 $\pm 5 \times 10^{-2}$ 量级开始，直至最近的十年，已发展到可达 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 约 200~300 赫的水平。但是，使用普通的方法若要获得这样一个准确度，无论是在过去或现在，都要使用大量较昂贵的线路和元件。所以，一般大量生产的电平测试仪器，其频率准确度也只能做到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 约 200~500 赫的水平。上述频率准确度对进行一般维护测量是可以的，但进行高质量的维护测量显然是不够的。这种测量要求具有 10^{-5} 量级的频率准确度。

锁相技术的发展和运用给提高电平测试仪的频率准确度提供了实际可能，它是通过一个锁相电路让石英振荡器的谐波来控制电平测试仪器中的可变振荡器的振荡频率，当电路处于锁定状态时，这个振荡频率就被锁定在石英振荡器的频率准确度和稳定度上，即具有与石英振荡器同样的频率准确度和稳定度。这样，具有频率锁定的电平测试仪器，其频率准确度可比一般的高出 2~3 个量级。目前高精度的电平测试仪器大多都采用频率锁定的方法。

事物总是一分为二的，利用锁相技术虽然可以很理想的

得到非常高的频率准确度，但是在电平测试仪器上，为了保证准确地读出频率，必须装备有高质量的精密机械齿轮驱动装置和胶带频率刻度盘，而且为了获得所需的准确度，在胶带频率刻度盘上还必须个别地进行频率刻度。这就导致仪器的机构复杂和昂贵。

近来，由于大规模集成技术有了新的发展，制造出了体积小、重量轻、耗电小（仅 100 毫瓦）的大规模集成电路计数器，这就有可能用频率计数器替代机械驱动的 频率 刻度盘，这样，就实现了频率读数的数字化，使频率准确度达到一个新的水平。

1.3 关于 电 平

在载波通信测试中，通常不直接计算或测量电路某测试点的电压和功率，而是计算它们对某一基准值的比值的对数关系，即用“电平”（或称传输电平）这一个相对值来计量，因为人的感觉对声音能量变化来说，也是符合对数关系的。

电平测量常用两种计量单位，即电压电平和功率电平，分别介绍如下。

1. 电压电平

在任意阻抗上，以 0.775 伏（正弦有效值）为基准电压作为零电压电平，则任意电压 U_x （伏）的电压电平可用下式计算：

$$P_v = 20 \log \frac{U_x}{0.775} [\text{分贝(dB)}] \quad (1-1)$$

$$P_v = 10 \lg \frac{U_x}{0.775} [\text{奈(N)}] \quad (1-2)$$

式（1-1）是以 10 为底的对数，dB 读作分贝；而式（1-2）是以 e 为底的对数，N 读作奈批，简称奈。

[例]测得某点电压为1.91伏，则以奈表示的电压电平为

$$P_v = \ln \frac{U_x}{0.775} = \ln \frac{1.91}{0.775} \approx \ln 2.72 = +1 \text{ N}$$

当 U_x 高于基准电压为正电平，反之为负电平。

2. 功率电平

功率电平以1毫瓦为基准功率，作为零功率电平，则任意功率 P_x （毫瓦）的功率电平可用下式表示：

$$P_w = 10 \log \frac{P_x}{1} \text{ (分贝)} \quad (1-3)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \ln \frac{P_x}{1} \text{ (奈)} \quad (1-4)$$

在实际工作中，分贝和奈这两个单位都是常用的，它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 奈 (N)} = 8.686 \text{ 分贝 (dB)}$$

$$1 \text{ 分贝 (dB)} = 0.115 \text{ 奈 (N)}$$

应该指出，对电压电平来说，不管电平振荡器的输出阻抗或电平表的输入阻抗多大，0奈电压电平在阻抗两端的电压都是0.775伏；但是功率电平则不然，随着阻抗不同，0奈功率电平在其两端产生的电压降各不相同，比如，600欧阻抗为0.775伏，150欧阻抗则为0.387伏*。由此可知，只有在600欧阻抗上，电压电平等于功率电平，而对其他阻抗，两者就不相等了。因此，就电平测试仪器来说，除600欧阻抗外（因为电压电平等于功率电平），在其他阻抗上必须明确是测量功率电平还是测量电压电平，因为阻抗不同，两种电平存在差别，但可以换算：

$$P_w = P_v \text{ (奈)} + \frac{1}{2} \ln \frac{600 \text{ 欧}}{Z_x} \text{ (奈)} \quad (1-5)$$

式中 $\frac{1}{2} \ln \frac{600 \text{ 欧}}{Z_x}$ ——修正项；

$$* U = \sqrt{ZP} = \sqrt{150 \Omega \times 1 \text{ mW}} \approx 0.387 \text{ V}$$

Z_x ——任意阻抗值。

从上式可以看出，当被测点的阻抗等于 600 欧时，修正项 $\frac{1}{2} \ln \frac{600 \Omega}{Z_x} = 0$ ，那么功率电平和电压电平是相等的。

如果 Z_x 不等于 600 欧，则必须在电压电平上加上修正项才等于功率电平。

〔例〕用电压电平表测得 $Z_x = 150$ 欧阻抗上的电压电平为 -0.694 奈，则换算成功率电平应等于

$$P_w = P_v + \frac{1}{2} \ln \frac{600 \Omega}{150 \Omega} = (-0.694 + 0.694) \text{ N} \\ = 0 \text{ N}$$

从上例可知，在 150 欧阻抗上功率电平与电压电平差 0.694 奈，也就是说，如用电压电平表测量功率电平，必须将测得的奈数加 0.694 (≈ 0.7) 奈。同样，对 75 欧阻抗则应加 1.037 奈。

目前，在一些多功能的电平测试仪器，在电路上，采取一些措施和开关选择，可做成既可直读电压电平，又可直读功率电平的通用电平测试仪器，我们将在以后详细讨论*。

我们都知道，要从电平表上得到被测的输入电平值，不单是读出指示表头的指示就行，而输入电平的读数总是受到不止一个控制旋钮步位的影响。如除输入衰减器的步位外，还有中频衰减器，同时电平表的总灵敏度亦因同轴输入或平衡输入而不同，如再加上电压电平与功率电平的换算，这样，使用人员在测量电平时，除要调整输入衰减器（即输入电平选择旋钮）的步位外，通常还必须考虑二、三个甚至更多的校正值。因此，使用人员必须作心算，给测量结果加上或减去这些修正值，这样才能得到实际的被测电平值。例

* 详见第二章和第五章。

如,用电压电平表同轴输入测量某点75欧阻抗上的电平值,如输入衰减步位置于-1奈,中频衰减器置于0奈,指示表头指示-0.5奈,那么被测输入电平为: $(-1 + 0 - 0.5 - 1)$ 奈 = -2.5奈,上式最后一项-1奈是考虑到在同轴输入时由于不经过平衡变量器,故使仪器总灵敏度增加1奈的修正值。如要换算成功率电平,那么上述测量结果还必须加上1.037奈的修正值,即 $-2.5 \text{奈} + 1.037 \text{奈} = -1.463 \text{奈}$ 。从上述例子可见,这样做不但麻烦和费时间,而且容易产生人为误差。不论这些校正值在仪器上显示有多精确,也不论这些校正值的描述有多详细,总之,人为误差是不可能消除的。

为了解决这个问题曾采取了不同的办法,比如用机械或机-电的方式,按照所用开关的位置来移动窗口,或将步位器度盘后面的照明灯位置改变等,目前多数仪器都采用这种方式。例如715型选频电平表,在输入电平选择开关度盘后装有两个定标指示灯,两者相隔1奈,根据输入方式(同轴或平衡)选择开关位置不同,点亮其中一个指示灯,如选择平衡输入时左灯亮,那么当从平衡输入改变到同轴输入时,指示灯变为右面的那个明亮,这样,由于输入方式不同所产生的1奈的修正值就无须让使用者心算而自动计入。这种方法虽然对仪器的操作质量有所提高,但解决办法还是不很理想的。

近来,由于大、中规模集成电路的发展和投入使用,电平测试仪器的电平和频率一样也可用数字显示,装在电平测试仪器上的电平数字式显示器以及它所用的显示逻辑电路,可以自动的监视影响仪器测量结果的各个控制开关的位置,从它的输入信息中计算并显示出被测电平值。利用这种显示逻辑电路已经能够充分达到操作简便、显示明确清楚这一要求,从而可消除人为误差,使电平测量的准确度达到一个新

水平。

1.4 电平测试仪器的工作原理

所有电平测试仪器，其工作原理都以外差法为基础，图 1—1 所示电平振荡器和选频电平表的原理方框图。

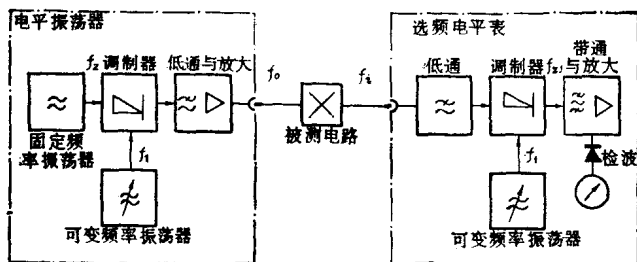


图 1—1 电平测试仪器的工作原理

在电平振荡器中，输出频率 f_0 是由可变频率 f_1 和固定频率 f_2 在调制器中混频形成，由调制器输出的差频 $|f_1 - f_2|$ 经低通滤波器和放大器而输出，而其他频率成分由于都高于最大输出频率，故都被低通滤波器滤除，即只有 $f_0 = |f_1 - f_2|$ 才能输出。例如， $f_1 = 900 \sim 1200$ 千赫， $f_2 = 1200$ 千赫，则可得输出频率为 $f_0 = |f_1 - f_2| = 0 \sim 300$ 千赫，实际上输出 300 赫 $\sim$ 300 千赫。

在选频电平表中，输入频率 f_0 经低通滤波器加到调制器，在调制器中 f_0 与可变频率 f_1 （又叫本机振荡频率）混频得两者之差频，叫做第一中频 $f_{s1} = f_1 - f_0$ ，中频 f_{s1} 由带通滤波器选出，经放大、检波，最后用直流电表指示。由此可知，选频电平表实质上是一个超外差式接收机。第一中频 f_{s1} 是固定的， f_{s1} 的选择不应选在选频电平表的工作频

率范围内，而且总是大于最高工作频率。例如，频率范围在2~300千赫的选频电平表，取 $f_{z1} = 465$ 千赫。对选频电平表的要求是具有良好的选择性和灵敏度，但是，要在第一中频上获得非常大的电压增益和选择性是有困难的。因此，现代选频电平表实际上都采用多次变频的接收方式。对300千赫选频电平表来说，一般采用二次变频，即第二次变频把 f_{z1} 变到一个较低的第二中频 f_{z2} ，一般 f_{z2} 取2~4千赫。选频电平表的整机灵敏度和选择性主要是在第二中频上取得的。

在选频电平表中接入低通滤波器的必要性是用来抑制第一象频，在接收信号频率 f_i 时，可变频率振荡器的频率应调在 $f_1 = f_i + f_{z1}$ ，以便在调制器中得到第一中频 f_{z1} ，并通过带通滤波器选出来。我们设想，如有一个频率 $f_{im} = f_i + 2f_{z1}$ ，这个频率在调制器中与 $f_1 (= f_i + f_{z1})$ 混频，所得差频也等于 f_{z1} ，因此 f_{im} 经变频后可毫无阻挡的通过带通滤波器，我们称 f_{im} 叫象频。加入低通滤波器后，由于 f_{im} 远大于最高信号频率，因此象频将落入低通滤波器的阻带，从而受到抑制。

电平测试仪器采用外差法的优点是，频率调谐无需划分成多个频段而完成仪器整个频率范围的覆盖，以300千赫电平振荡器为例，要求输出频率从300赫~300千赫，即频率的覆盖比达1:1000，由于采用外差法，只要求可变频率振荡器的频率从900千赫变到1200千赫，频率的覆盖比仅1:1.3，这就无需分成频段很易实现的。对选频电平表来说，一次调谐就能包括整个频率调谐范围，这就给搜索未知信号的工作带来极大的方便。

当电平测试仪器用来作扫频测量时，外差法的优点更为突出，因为只要对可变振荡器的频率进行窄带扫频，就可从输出频率得到宽频带的扫频信号。

外差法的另一个优点是，使得电平振荡器与选频电平表能够实现所谓统一调谐（简称统调）。从图 1—2 可见，如果选择 $f_2 = f_{s1}$ ，即电平振荡器的固定振荡器频率等于选频电平表的第一中频，那么两者可公用一个可变频率振荡器来完成选频测量工作。因为，电平振荡器输出频率 $f_o = |f_1 - f_2|$ ，而选频电平表的输入频率 $f_i = f_o = |f_1 - f_2|$ ， f_i 在调制器中与 f_1 混频得第一中频 $f_{s1} = |f_1 - f_i|$ ，由于两个 f_1 是来自一个振荡源，故 $f_{s1} = f_2$ 。利用统调可大大减少选频测量工作的时间，因为我们只要调谐一个振荡器频率，就能做到同时改变电平振荡器的输出频率和选频表的接收频率，使得选频测量如同工作在宽频测量一样方便。

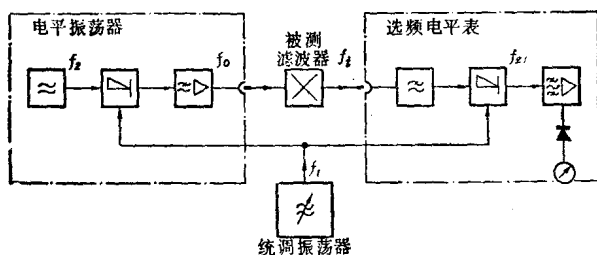


图 1—2 电平测试仪器的统一调谐

以上我们讨论了以外差法为基础的电平测试仪器的的工作原理，正如前述，对电平测试仪器的主要要求是，具有高的频率和电平准确度以及高的灵敏度和选择性，考虑到这些要求，仪器的实际组成要比图 1—1 所示复杂一些。下面我们将结合 300 千赫和 1.7 兆赫电平振荡器和选频电平表的典型产品进行具体介绍。