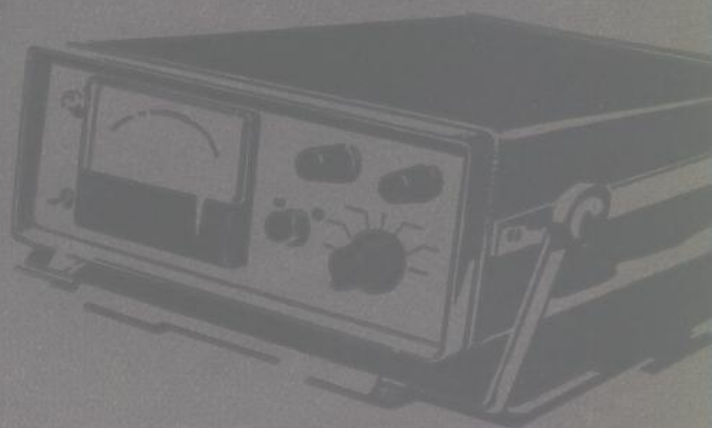


常用微波测试仪表

Changyong Weibo
Ceshi yibiao

1



人民邮电出版社



常用微波测试仪表

第一辑

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书是“常用微波测试仪表”第一辑。内容是介绍GX2A型微瓦功率计、BE-1型调制度测量仪和BT2型超高频频率特性测试仪三种仪表。书中对每种仪表的原理、使用和常见故障检修等都做了介绍，并且提供了一些数据资料，便于使用与维修时参考。

常用微波测试仪表

第 一 辑

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₃₂

1978年4月第一版

印张：3¹²/₃₂ 页数：54 插页：3 1978年4月北京第一次印刷

字数：77千字

印数：1—17,500册

统一书号：15045·总2202-无645

定价：0.32元

出版说明

伟大的无产阶级文化大革命运动，推动了我国微波通信的迅速发展，微波设备成倍增长。微波仪表的使用，在设备的研制与维护工作中占有十分重要的位置，各地迫切要求阅读常用微波测试仪表的原理与维护的图书。为此，我们结合目前常用微波测试仪表，组织编写有关使用和维护的资料，汇集成册，陆续出版。

本书是第一辑，内容包括 GX 2 A 型微瓦功率计、BE-1 型调制度测量仪和 BT 2 型超高频频率特性测试仪三种仪表。本书对每种仪表的原理、使用和常见故障检修等都作了介绍，并提供了一些数据资料，便于使用维护仪表的读者参考。

由于时间仓促，可能还存在一些缺点和错误，望读者批评指正。

1977 年 6 月

目 录

GX 2 A 型微瓦功率计

.....“上海无线电二十六厂功率计设计小组”(1)

BE-1 型调制度测量仪舒福荣 (30)

BT 2 型超高频频率特性测试仪

.....南京无线电仪器厂 尹东升 潘礼泉 (67)

GX 2 A 型微瓦功率计

GX 2 A 微瓦功率计是一种精密的测量仪器,可直接测量连续或脉冲调制的微波功率平均值。可供科研、院校、工厂、计量及通信维护单位测量 μW 级及 mW 级的微波功率。此功率计使用简单,携带方便。

一、主要技术性能

1. 功率探头的功率量程、频率范围及驻波系数(见下表)

编号	类别及型号	功率量程	频率范围	驻波系数	最大脉冲功率峰值	定 标 条 件
1	同轴型 GX2-N ₁ (1)	10 μW ~ 10 mW	0.5~12.4 GHz	$S < 1.5$	3W	频率 3 GHz 功率 1 mW 或3 mW
2	同轴型 GX2-N ₁ (3)	1 mW ~ 300 mW	0.5~12.4 GHz	$S < 1.7$		频率 3 GHz 功率 3 mW 或10 mW
3	波导型 GX2-N ₃ (1)	20 μW ~ 20 mW	46~54 GHz	$S < 1.5$	3W	频率 50 GHz 功率 2 mW 或6 mW
4	波导型 GX2-N ₃ (2)	100 μW ~ 100 mW	46~54 GHz	$S < 1.5$	30W	频率 50 GHz 功率 3 mW 或10 mW
5	同轴型 GX2-N ₁ (2)	100 μW ~ 100 mW	8.2~18 GHz	$S < 1.7(8.2 \sim 17 \text{GHz})$ $S < 2(17 \sim 18 \text{GHz})$	30W	频率 10 GHz 功率 3 mW 或10 mW
6	波导型 GX2-N ₃ (2)	100 μW ~ 100 mW	26.5~40 GHz	$S < 1.7$	30W	频率 33 GHz 功率 3 mW 或10 mW
7	波导型 GX2-N ₃ (2)	100 μW ~ 100 mW	18~26.5 GHz	$S < 1.5$	30W	频率 22 GHz 功率 3 mW 或10 mW
8	波导型 GX2-N ₇ (2)	100 μW ~ 100 mW	12.4~18 GHz	$S < 1.5$	30W	频率 15 GHz 功率 3 mW 或10 mW
9	波导型 GX2-N ₃ (2)	100 μW ~ 100 mW	8.2~12.4 GHz	$S < 1.6$	30W	频率 10 GHz 功率 3 mW 或10 mW

续表

编号	类别及型号	功率量程	频率范围	驻波系数	最大脉冲功率峰值	定 标 条 件
10	波导型 GX2-N ₀ (2)	100 μ W~ 100 mW	3.95~5.85 GHz	$S < 1.6$	30W	频率 4.9 GHz 功率 3mW或10mW
11	波导型 GX2-N ₁₀ (2)	100 μ W~ 100 mW	65~75 GHz	$S < 1.5$	30W	频率 70 GHz 功率 3mW或10mW

注：最大脉冲功率峰值是在脉冲重复频率大于 1000 Hz 脉宽 1 μ s 情况下测得的，但其平均值不得超过表中所列功率量程范围。

2. 指示器共分七档：10 μ V，30 μ V，100 μ V，300 μ V，1 mV，3 mV，10 mV。

3. 特性阻抗：同轴型功率探头：50 Ω 。

4. 输入接头：同轴 N 型连接螺纹 M 16 $\times$ 1。

5. 仪器的误差：

(1) 指示器在正常条件下基本误差小于等于满度值的 $\pm 4\%$ ，10 μ V 档为满度值的 $\pm 6\%$ 。仪器经半小时预热后，10 μ V 档零点或指示值的漂移每分钟 $\leq 0.5 \mu$ V。

当环境温度偏离正常值时，指示器因温度引起的附加误差每度不超过 $\pm 0.2\%$ 。

(2) 功率探头在规定的定标频率和功率上进行(见上表)，其指示值与标准相比其误差不大于 $\pm 8\%$ 。

二、电路工作原理

GX 2 A 微瓦功率计是将微波功率借助于功率探头(即转换器)转换成直流电压，以实现微波功率的测量。它由功率探头和指示器组成。其方框图见图 1。

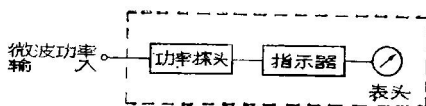


图 1 GX 2 A微瓦功率计方框图

1. 功率探头

这里重点介绍 GX 2 A-N₁ 型同轴功率探头(波导型探头的原理与它相同)。它的外形图和结构图, 如图 2 及图 3 所示。

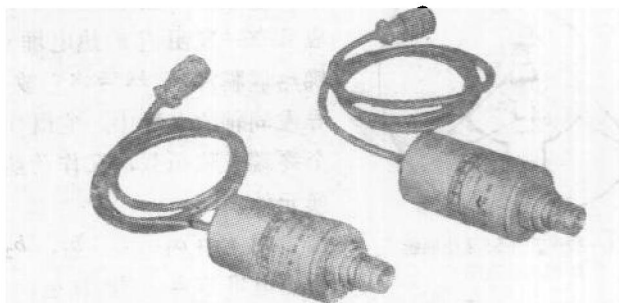


图 2 GX 2 A-N₁ 型功率探头外形图

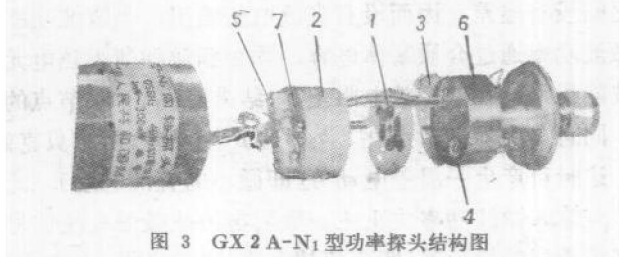


图 3 GX 2 A-N₁ 型功率探头结构图

图 3 中的标号是: 1. 铂铑热偶膜片, 2. 电极盖, 3. 涤纶薄膜(绝缘层), 4. 弹簧电极, 5. 电位器, 6. 探头支架, 7. 固定螺钉。

由图 3 看出, 功率探头是由热偶元件及支架座组成。热电

体间的陶瓷片状电容(约1500 pF), C_2 和 C_3 为探头支架、涤纶薄膜、膜片上的电极组成的介质基体电容。 C_1 、 C_2 、 C_3 起高频旁路、耦合及隔直流作用。

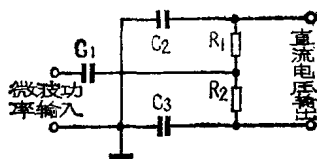


图 5

由图 5 看出：每对热电偶之间的直流电阻 R_1 、 R_2 是串联的，其总直流电阻 $R = n^2 Z_0$ 。式中， n 为热电偶的对数， Z_0 为同轴线特性阻抗。图 2 所示的同轴型 GX 2 A-N₁ 型探头，其 $Z_0 = 50 \Omega$ 、 $n = 2$ ，则 $R = 200 \Omega$ (即 $R_1 + R_2 = 200 \Omega$)。在实际使用中，若需更换铋锑膜片时，首先需量这一直流电阻，看其是否符合要求。 R_1 和 R_2 对微波阻抗而言为并联关系。另外，由图 3 得知，由于两对热电偶是串联的，因此探头输出的总直流电动势 E_t 为每对热电偶产生的电动势 E_{t_1} 、 E_{t_2} 之和，即：
$$E_t = E_{t_1} + E_{t_2}。$$

2. 指示器

指示器的作用是为了显示高频探头所产生的直流电压，但因探头输出的直流电压(最小只有几个 μV) 很小，所以必须进行高倍数放大才行。

指示器由直流放大器和显示部分组成。直流放大器一般分为不对信号进行变换的，和对信号进行变换的两种。前者电路简单，但因其零点漂移和噪声均大，故灵敏度低，一般只能做到 mV 级。而后者是把输入的直流信号转换成固定频率的交流信号，再对交流信号进行放大，最后把放大的交流信号恢复成直流信号，以便推动表头指针摆动，指示出信号的大小。这种直流放大器中的交流放大器的漂移可以做得极其微小，故其灵敏度可做得很高。所以这里采用了对信号进行变换的直流放大器。

指示器的显示部分，可采用指针式指示的或数字显示的。指针式指示的电路简单、成本低、灵敏度高，缺点是精度低。数字显示的电路相当复杂、成本高、灵敏度相对于指针式的来讲是较低的，但精度可以做得高。这里采用的是指针式指示的。

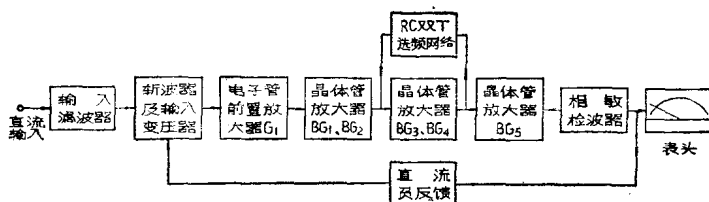


图 6 指示器方框图

图 6 是指示器的方框图。主要由输入滤波器、斩波器及输入变压器和由 G_1 和 $BG_1 \sim BG_5$ 组成的交流放大器、相敏检波器等组成，现分别介绍于下：

(1) 输入滤波器

采用输入滤波器可有效的抑制噪声（这种噪声基本上是 50 Hz 的感应噪声）。因为 LC 滤波器容易感受杂散磁场，所以输入滤波器一般不采用 LC 形式，本电路的输入滤波器是由 R_1 、 R_2 、 R_3 及电容 C_1 、 C_2 组成，见图 7。

加入输入滤波器后会对直流输入信号产生衰减，这对放大器是不利的。但由于加入输入滤波器可以提高直流放大器的输入阻抗（输入阻抗由滤波器电阻的大小来决定），这样一方面可起到滤波作用，同时可使直流信号衰减很少。

(2) 调制器

斩波器 ZDZ_1 （见图 7）、激励电压（6.3 V、50 Hz）和输入变压器 B_1 组成了调制电路。它的作用是把微小的直流信号转换成交流信号（方波）。

斩波器有很多种, 目前使用最多的是机械斩波器和晶体管斩波器。它们各有优缺点, 机械斩波器的优点是噪声小, 但由于它是靠簧片摆动接触来进行工作的, 所以寿命较短。频率越高, 寿命越短, 一般一个机械斩波器出厂标称工作时间为 $500 \sim 1000$ 小时。同时它的调制频率较低 (一般在 $50 \text{ Hz} \sim 400 \text{ Hz}$ 之间)。晶体管斩波器调制频率高、寿命长, 但噪声大、温度特性也差。因为 GX 2 A 微瓦功率计指示器中涉及到需要很高的灵敏度, 同时斩波器处于前级, 它的噪声会产生很大的影响, 所以本电路使用了一个 ZB-6-6.3 型低噪声机械斩波器, 工作在 50 Hz 的频率上。

机械斩波器的工作是通过激励线圈通入交流电 (6.3 V), 即产生交变磁场, 将与线圈相连的振动片上端的磁性部分磁化。使振动片在固定的永久磁铁的磁场作用下, 产生和激励频率相同的振动, 从而使振动片下端的振动接点, 在其左右固定的接点间交替接通和断开, 进行工作。图 8 为机械斩波器结构示意图。

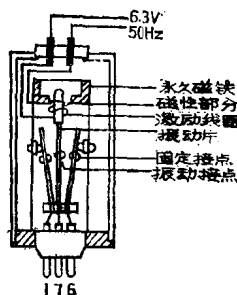


图 8 机械斩波器结构示意图

功率探头的输出阻抗为低阻抗 (200Ω 左右), 低输入阻抗的指示器其灵敏度可做得高, 但要引入额外的误差, 因此指示器阻抗一般要求的较高, 这里为 $10 \text{ K}\Omega$ 左右, 于是在放大器 G_1 的前面加了一个 $1:15$ 的升压变压器 B_1 , 以提高信号噪声比 (由于输入变压器是一无源网络)。

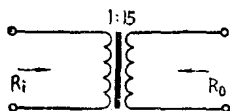


图 9 输入变压器阻抗匹配图

采用 $1:15$ 的升压变压器是因为当第一级电子管放大器的输入阻抗 R_0 为 $1 \text{ M}\Omega$ 时 (见图 9), 将它换算到变压器的输

入端，其阻抗 R_i 为：

$$\frac{R_i}{R_0} = \frac{1}{n^2}$$

式中 $n = \frac{W_2(\text{变压器次级线圈圈数})}{W_1(\text{变压器初级线圈圈数})}$

$$\text{则 } R_i = \frac{R_0}{n^2} = \frac{1 \text{ M}\Omega}{15^2} = 4.5 \text{ K}\Omega$$

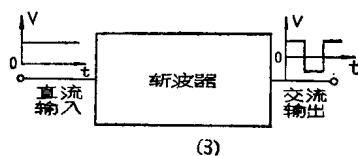
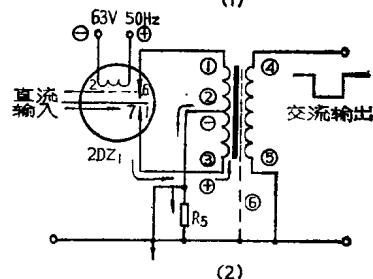
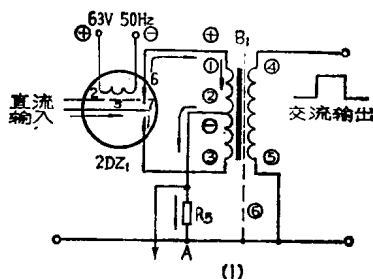
由图 7 知， R_1 、 R_2 、 R_3 均为 $1.8 \text{ K}\Omega$ ，则 R_i 再加上滤波电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 为：

$4.5 \text{ K}\Omega + 1.8 \text{ K}\Omega \times 3 = 9.9 \text{ K}\Omega$ ，可取为 $10 \text{ K}\Omega$ ，这样，使得指示器的输入阻抗在最灵敏档 ($10 \mu\text{V}$) 上为 $10 \text{ K}\Omega$ 左右。其它各档随着全回路直流负反馈的加强而使输入阻抗增大。

因为输入变压器 B_1 处于整个放大器的输入端，对它的要求是很高的。铁心采用的是坡莫合金材料，对初级电感量也有一定的要求，工艺上采用了对称的绕制方法，为最大限度地防止电磁场的干扰，外壳采用了坡莫合金屏蔽。

调制器的工作原理：

欲放大的直流信号是一个正电压，当加上激励电压时，斩



(1) 上半周电流通路 (2) 下半周电流通路 (3) 斩波器变换图

图 10 调制器工作原理图

波器动片 7 与定片 1 和 6 交替地接通和断开。当某一瞬间激励电压为左(+)，右(-)时，这时 7 与 6 通，电流方向如图 10(1) 所示，这时可见输入变压器初级的 1 脚为(+)，2 脚为(-)，当激励电压方向相反，如图 10(2) 所示时，斩波器 7 与 1 通，电流方向如图 10(2) 所示，输入变压器的 3 脚为(+)，2 脚为(-)，由于激励电压是以 50 Hz 的频率不断变换方向，所以输入变压器的初级 1 脚与 3 脚的电流方向也以同样的速度变换方向。这样在变压器的次级将有输出频率为 50 Hz 的交流电压(同时经输入变压器升压)，这个输出的交流电压大小仅与输入直流电压成正比，与激励电压无关，见图 10(3)。

(3) 交流放大器

交流放大器由两级电子管前置放大器 G_{1a} 和 G_{1b} 和五级晶体管放大器组成，总的开路电压增益达 10^6 左右。它将已调制后的交流信号进行放大。

对前置放大器有两个要求：(1) 低噪声 (2) 高输入阻抗。关于低噪声问题见图 11，如有三级放大器其噪声系数表示式为：

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 K_2}$$

式中 F ——总噪声。

F_1, F_2, F_3 ——为第一、二、三级的噪声。

K_1, K_2 ——第一、二级放大量。

从上式中我们看出噪声的主要来源是第一级，设法减小第

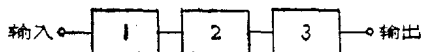


图 11 放大器噪声系数分配图

一级的噪声是个关键问题。

对于高输入阻抗问题，前面已介绍，输入变压器后面的交流放大器的第一级大约要有 $1\text{ M}\Omega$ 的输入阻抗。所以指示器采用一个 $6\text{N}4$ 的低噪声双栅极电子管，第一级作电压放大，第二级为阴极输出器，因为电子管放大器后面的 BG_1 为晶体管放大器，起阻抗匹配作用（晶体管共发射极组态输入阻抗是低的）。第一级放大量为 20 倍。为了减小噪声，第一级电子管放大器的板压和板流是选择得较低的，板压约 65 V ，板流为 0.1 mA 。灯丝电压为 -4.7 V 采用稳定的直流稳压电源供电。

五级晶体管放大器在没有全回路直流负反馈的情况下电压放大倍数达 2×10^4 。基本上采用分压偏置的共发射极组态。前面两级 BG_1 和 BG_2 采用低噪声晶体三极管 $3\text{AX}31\text{E}$ ，工作点选得较低，约 0.8 mA ，对减小噪声有利。由于作调制用的机械斩波器工作在 50 Hz 频率上，所以交流放大器也在 50 Hz 的频率上工作，这样对放大器 50 Hz 的电源干扰特别厉害。而低噪声的硅晶体三极管工作在 50 Hz 时其噪声比低频低噪声的锗晶体三极管要大，因此在此放大器电路中采用了锗晶体管。但锗晶体管的温度性能较差，因此在电路中采用了加深全回路负反馈的措施来克服此缺点。经多年生产，此仪器在环境温度 $-10^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 范围内其性能还是能满足要求的。最后一级 BG_5 是功率输出级，采用小功率管 $3\text{AX}81\text{B}$ 以提高功率输出。其后用一个输出变压器 B_2 ，其阻抗近于 $2:1$ ，这个变压器一方面起阻抗匹配作用，另一方面则是为了满足相敏检波器的要求，以达到单边输入平衡输出的目的。

(4) RC 双 T 选频网络

在放大器中除了有用的 50 Hz 信号外，还有无用的感应进来的其它频率的干扰信号，如 100 Hz 等。应设法把它滤去，使

其只能通过 50 Hz 频率的信号，因此在放大电路中就采用了 RC 双 T 选频网络，见图 12(1)。

从图 12(2) RT 本身特性图中看出，在信号频率 50 Hz 时网络的阻抗非常大，使信号没有输出，而我们要求是在 50 Hz 时衰减很小，得到足够的放大，要达到这个目的，可以把 RC 双 T 网络作成负反馈网络来应用。这样，整个放大器的选频特性如图 12(3)。双 T 选频网络的频率由 RC 来决定。

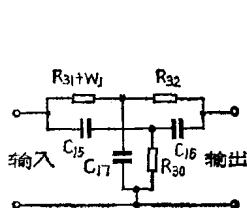


图 12(1) RC 双 T 选频网络

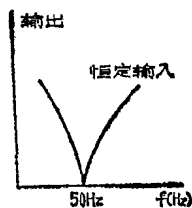


图 12(2) RC 双 T 本身特性

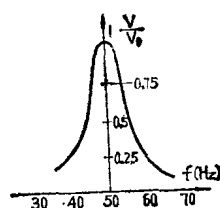


图 12(3) 放大器选频特性图

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(R_{31} + W_1)C_{15}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 6.8 \times 10^3 \times 0.47 \times 10^{-6}} = 50 \text{ Hz}$$

这个频率在不同的 R 值来确定一个 C ，但有一个最佳的 R 值

$$R_{\text{最佳}} = \sqrt{2 r_1 r_2} = \sqrt{2 \times 2.2 \times 10^3 \times 10 \times 10^3} = 6.65 \times 10^3$$

式中 r_1 ：网络输入阻抗(2.2 K)

r_2 ：网络输出阻抗(10 K)

取标称值 6.8 K Ω 。

$$\text{对于对称双 T 网络 } C_{17} = 2 C_{15} = 2 C_{16}, R_{30} = \frac{1}{2} R_{32}$$

在实际调试中，由于晶体管或阻容元件的差异，因此 R_{32}

不是用 $6.8\text{ K}\Omega$ 而是用 $7.5\text{ K}\Omega$ ，同时选用一电位器 $\mathcal{W}_1$ 来改善选频特性。

在晶体管放大器中，在发射极中串入一个适当的电阻构成交流负反馈电路，调换 R_{16} 或 R_{21} 的阻值，可控制 BG_1 和 BG_2 的放大量，当 R_{16} 或 R_{21} 减小时，这时负反馈放宽，也就提高了增益。这个措施可保证由于晶体管 β 值的改变或阻容元件值的差异而能调节到规定的放大量。

(5) 相敏检波器

前面已谈到相敏检波器的作用是把放大了的交流电压转换成直流电压来推动表头指针。相敏检波器与普通的整流器是不同的，它既能反映输入到检波器交流信号振幅的变化，又能反映相位的变化。由图 7 知输出变压器 B_2 的次级接在电桥的一个对角线上，桥的另一对角线由电源变压器 B_3 馈电，作为开关电压。 B_2 和 B_3 次级中心抽头作为直流输出端。在电桥的每一臂中必须串入一个限流电阻，否则由于开关电压 B_3 次级短路会把二极管 $BG_{11} \sim BG_{14}$ 烧毁。同时限流电阻 $R_{37} \sim R_{40}$ 的大小是控制灵敏度和稳定性的，电位器 $\mathcal{W}_2$ 是用来调节平衡的（由于电阻值和二极管特性不一致）。开关电压的作用是保证相敏检波器正常工作，使被它截止的晶体二极管在信号电压的作用下不能导通，所以开关电压应远大于信号电压，这里开关电压选择每边 10 V 为宜。由于信号频率正好为电源频率 50 Hz ，所以开关电压可直接从电源变压器中取出，不另行设计振荡器，同样斩波器的激励电压 6.3 V 也是从电源变压器中取出的。相敏检波器的工作原理见图 13。从图 13(1)中看出，当开关电压 G_+ ， E 时，这时二极管 BG_{12} 和 BG_{13} 导通，而 BG_{11} 和 BG_{14} 截止，这时假设信号电压的极性是 C_+ ， A_- 。而 B 相对于 C 也为负(B 相对于 A 为正)。这时电流通过的途径是 $C \rightarrow BG_{13} \rightarrow E$