

引力波天线Q值测试仪

陈嘉言 管同仁 于 珩

(引力物理研究室)

引力波天线Q值的大小与温度、气压、天线悬挂方式和换能器的附加损耗等外界因素,有关。为了详细观察外界因素变化对Q值的影响,测量Q值时速度必须尽量快,此外测量最好能自动地进行。

文献〔1〕中所介绍的利用测量衰减时间来求取Q值的方法,由于需要进行多次逐渐逼近式的测量才能得到测量结果,因此测量速度慢。另外,由于该方法采用外激发方式激励待测棒起振,因此当我们有意地连续改变施于待测棒的外界条件(譬如温度),以观察Q值及谐振频率的变化时,待测棒的纵向基模频率就会发生相应的改变,从而偏离激发源的频率,这个情况使得自动化测量不易实现。

本文所介绍的Q值测试仪采用测量振动次数的方法来求取Q值,因而测量能一次完成,具有测量速度快的优点。另外,仪器采用自激发方式激励待测棒起振,避免了在技术上实现频率跟踪的困难,因而较容易地就实现了自动测量的目的。除此之外,由于待测棒能自激起振,所以适当地配备一台数字频率计还能准确地测量待测棒的谐振频率。

和文献〔1〕所介绍的仪器相比较,本文所介绍的仪器在测量Q值时可以省掉数字频率计和高稳定度的低频信号源(例如频率合成器)等两台仪器。

一、测量公式

中间支撑或悬挂的水平棒材的Q值测量公式为〔1〕

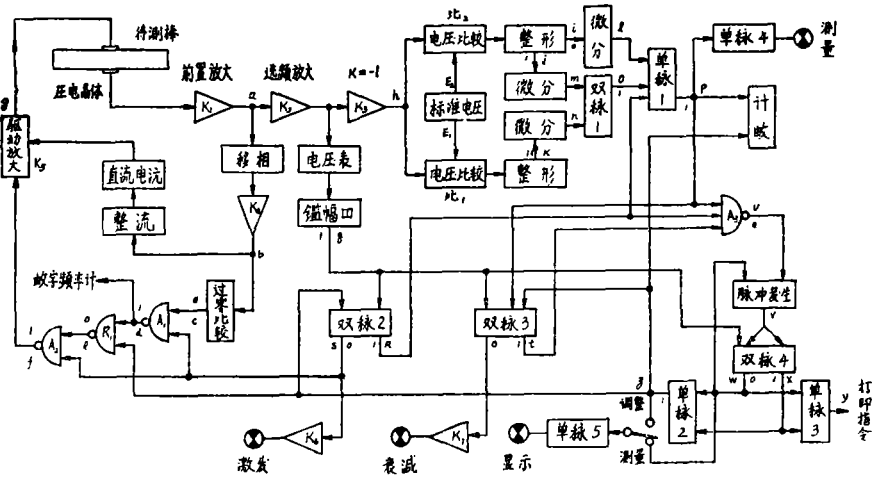
$$Q = \pi n$$

式中, n 为棒做基频振动时振幅从某一值衰减至原值的 $\frac{1}{e}$ 时,在这一段时间间隔中棒所振动过的次数。

本仪器测量的是上式中的 n 值。

二、仪器工作原理

图一为仪器的工作原理方框图。图中标的工作状态为上一次测量已经结束,下一



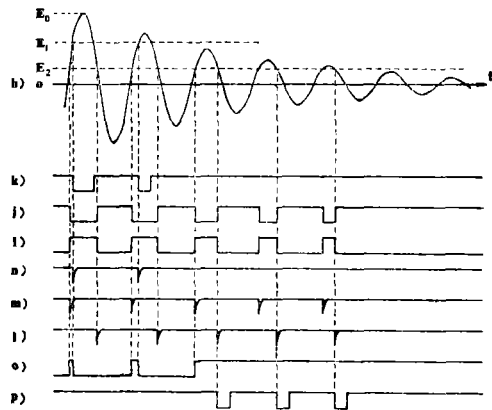
图一 引力波天线 Q 值测试仪原理方框图

次测量刚开始时的状态。

仪器由测量系统、自激发系统、控制系统、电源等四部分组成。下面分别介绍前三个部分。

1、测量系统

待测棒的振动由粘在棒中部的压电晶体检出，经前置放大器 K_1 、选频放大器 K_2 和反相放大器 K_3 适当放大后，同时输给两个电压比较器 $比_1$ 和 $比_2$ 。 $比_1$ 的门限电压 E_1 比 $比_2$ 的门限电压 E_2 大 e 倍，两者都由标准电压电路供给。当信号电压的幅度超过 E_1 和 E_2 时， $比_1$ 和 $比_2$ 即启动，它们输出端的电压经整形后被转换成前后沿陡峭的方波（见图二）。方波再经微分后，其负向尖脉冲 l 做为计数脉冲输给单稳态电路 $单_1$ ；负脉冲 m 和 n 做为控制脉冲输给双稳态电路 $双_1$ 。由于 $双_1$ 的输出端 O 与 $单_1$ 的输入端相连接，所以 l 能否触发 $单_1$ 受 m 和 n 的控制：



图二 检测电路各级波形

(1)如果信号电压振幅上升至超过 E_1 ，则 n 在 l 到来之前就先触发双稳态电路 $双_1$ ，使其输出端 O 降为低电位，从而把单稳态电路 $单_1$ 封锁，这样稍后来到的 l 就不能触发 $单_1$ 。

(2)如果信号电压振幅衰减至小于 E_1 而又大于 E_2 ，则负脉冲 n 消失。双稳态电路 $双_1$ 受

到在 l 之前的 m 的单一作用,输出端 O 翻转到高电位并一直维持下去.这时单稳态电路单 $_1$ 不再被封锁,续后而来的 l 将不断触发单 $_1$,于是其输出端 P 将出现一系列宽度固定的负向计数脉冲.

(3)如果信号电压振幅继续衰减至小于 E_2 ,则电压比较器不再启动.电路无计数脉冲输出.

从单稳态电路单 $_1$ 输出的计数脉冲用十进计数器进行计数.

2、自激发系统

待测棒、检测用的压电晶体、前置放大器 K_1 、移相器、放大器 K_4 、过零比较器、与非门 A_1 、或非门 R_1 、与非门 A_2 、驱动放大器 K_5 和激发用的换能器共同构成一个串联自激环路.环路中的与非门 A_1 和与非门 A_2 的输入端与双稳态电路双 $_2$ 的输出端 S 相连,由 S 端的电位控制自激环路的通断.当 S 端为低电位时,与非门 A_1 和与非门 A_2 被封锁,自激环路不通;当 S 端为高电位时,与非门 A_1 和 A_2 开启,自激环路闭合.若在环路闭合的同时从单稳态电路单 $_2$ 的 z 端输出一个负激发脉冲,经过或非门 R_1 进入自激环路形成一个初始扰动,环路就会产生自激振荡,棒的振动逐渐加强.

为了将棒的振动幅度稳定下来,以便调节选频放大器的频率,从放大器 K_4 的输出端引出一部分振动信号,经整流后控制驱动放大器 K_5 的直流供电电路,使直流电压随信号幅度的上升而相应下降.由于驱动放大器 K_5 是脉冲放大器,所以 K_5 输出的方波幅度也就随着直流电压的下降相应地下降,最终使待测棒的振幅稳定到某一预期值.

环路中的过零比较器起两个作用:当振动信号较大时,过零比较器作为非线性元件起限幅整形作用,把信号整形成方波;当振动信号很弱时,过零比较器起放大作用,从而保证在自激振荡初建立时自激环路的总放大倍数足够高,因此即使在只有微弱扰动信号存在的情况下,环路也能形成自激振荡.

3 控制系统

仪器测量 Q 值的工作分四个阶段进行:自激发振荡、自由衰减振荡、测量、显示.仪器内部的逻辑电路根据工作进程发出指令,控制各部分电路按顺序进行正常工作.下面按工作阶段分别叙述.

(1) 自激发振荡

在上一循环的测量全部结束以后,从单稳态电路单 $_2$ 的 z 端输出一个负向脉冲,这个脉冲分三路:第一路使计数器复零,第二路触发双稳态电路双 $_2$,使 S 端升至高电位, R 端降至低电位. S 端的高电位把与非门 A_1 和与非门 A_2 打开,使自激环路闭合. R 端的低电位一方面输给单稳态电路单 $_1$,把单 $_1$ 封锁,以防止在自激发过程中有脉冲混过单 $_1$.另一方面还输至与非门 A_3 ,使其输出端 U 的电位由低而高,迫使延时脉冲发生器停止振荡;第三路通过或非门 R_1 进入自激环路,人为地引入初始扰动,引发环路自激.

(2) 自由衰减振荡

随着自激发振荡的逐渐加强,从反相放大器 K_3 输出的信号电压振幅超过门限电压 E_1 而达到某一预定值 E_0 ,这时鉴幅器起动,从 q 端输出负向脉冲,此负向脉冲同时触

发双稳态电路双₂和双稳态电路双₃。双₂翻转后S端电位由高降至低，将与非门A₁和与非门A₂关闭，自激振荡停止，待测棒进入自由衰减振荡状态。与此同时，R端电位由低升至高后，将单稳态电路单₁的封锁解除。为了防止R端的高电位导致延时脉冲发生器恢复振荡，将双₃输出端t的低电位引到与非门A₃的输入端，用它来代替双₂翻转前R端的低电位。

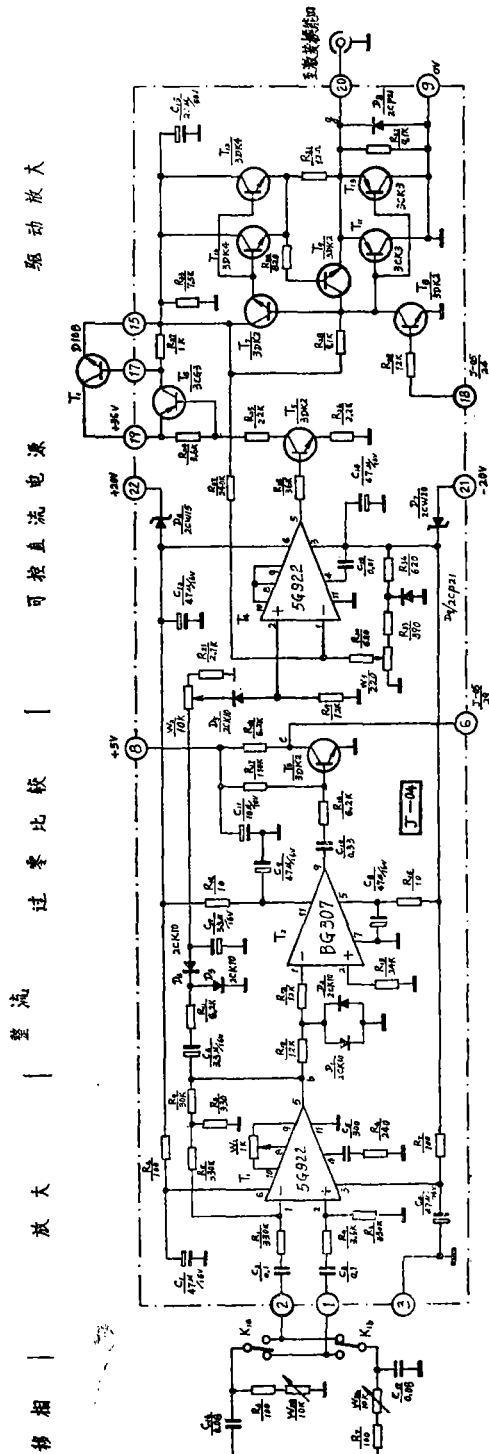
(3) 测量

当信号电压振幅衰减到低于门限电压E₁后，单稳态电路单₁开始输出负向计数脉冲。此脉冲分三路：第一路触发计数器进行计数；第二路触发双稳态电路双₃，将其t端翻回至高电位。在此高电位的作用下，与非门A₃输出端U降至低电位；第三路输给与与非门A₃，代替双₃翻转前t端低电位的作用。

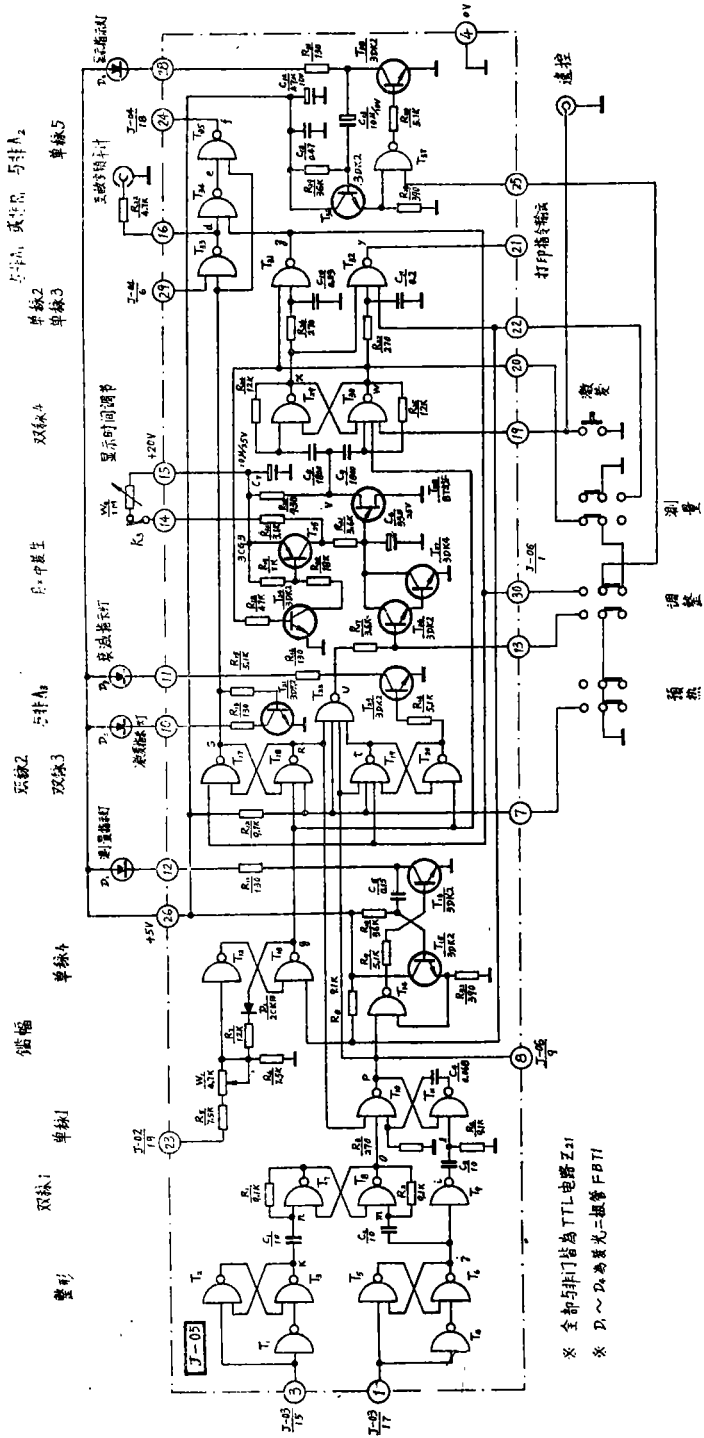
(4) 显示

当信号电压振幅衰减至小于门限电压E₂后，单稳态电路单₁停止输出计数脉冲，计数器终止计数，数码管显示出测量结果。

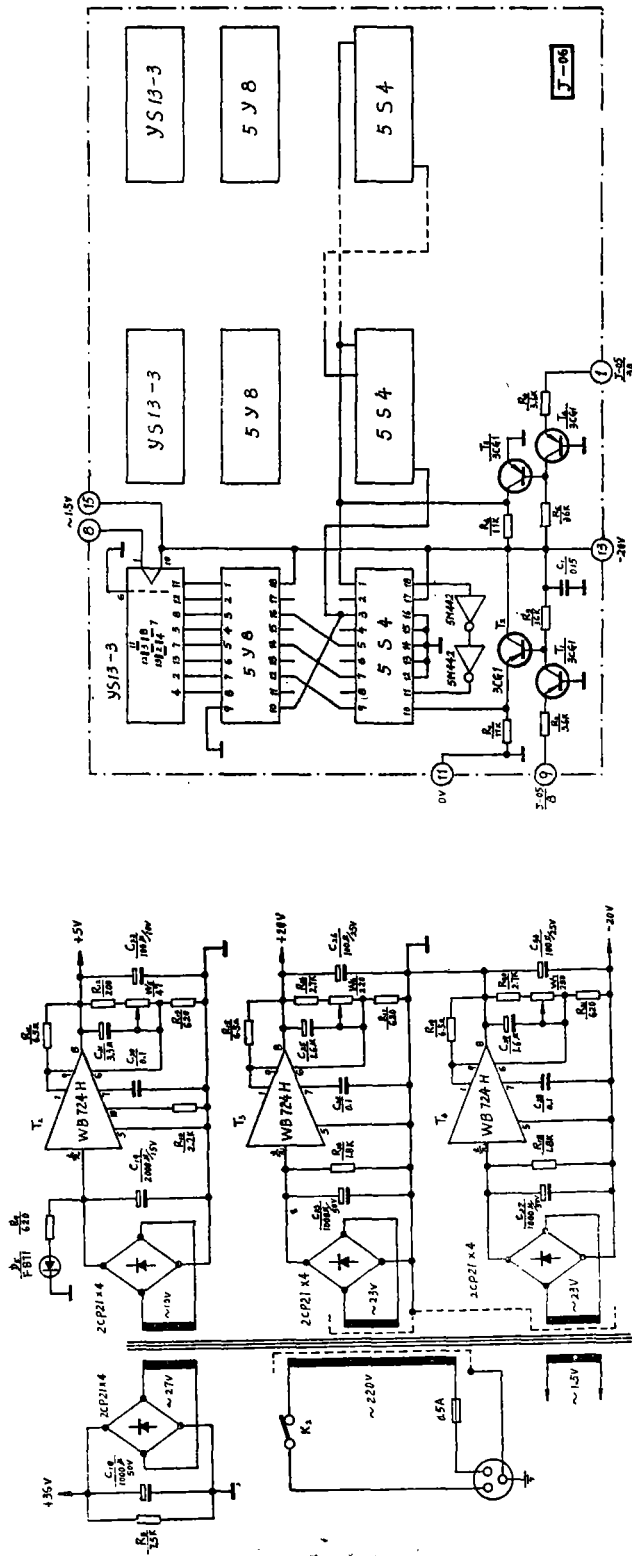
由于与非门A₃的输入端不再有负向脉冲输入，所以输出端U稳定在低电位，这时延时脉冲发生器不再受抑制，开始进入工作状态。经过一个短时间之后，从延时脉冲发生器V端输出一个负脉冲，触发双稳态电路双₂，进而使单稳态电路单₂输出一个负向打印指令脉冲。这之后，经过一个延长的时间（显示时间）之后，延时脉冲发生器产生第二个负向脉冲，双₂双稳态电路被触发再次翻转，于是单稳态电路单₂输出一个负向激发脉冲，开始了下一循环的测量。



图三 激发系统电路



图八 激发、测量、控制等系统电路



图九 计数电路

图十 +5V, +20V, -20V 稳压电源

三、电路介绍

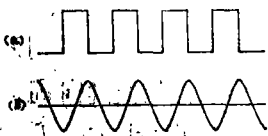
图三至图十为仪器的电路工作原理图。现将其中部分电路的工作原理说明如下。

1、移相放大器

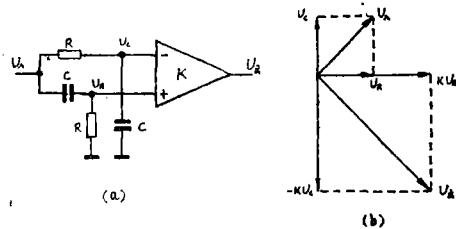
图十一绘出了激励待测棒所需的方波和待测棒振动波形之间的相位关系。从图中可以看出，激励方波应比被激棒的振动波形在相位上超前 90° 。为了满足这一要求，需要在自激环路中加入一级移相器，将从待测棒检出的振动信号移前 90° 后再输给驱动放大器。这个移相器可以加在放大器 K_4 的前面（见图一），但需要满足如下要求，即信号通过移相器之后只是相位发生移动，而信号的幅度不发生改变。这样，在调节移相器改变相移的时候，从放大器 K_4 输出的信号振幅才不会改变，从而不致影响稳幅效果，也不降低环路的总放大倍数。

图三中的电阻 R_6 、 R_7 、电位器 W_{3a} 、 W_{3b} 和电容 C_{16} 、 C_{17} 共同构成两个移相器，这两个移相器的输出端分别与集成电路 T_1 的两个输入端相连接。既移相而又不改变信号幅度的作用是由这两个移相器和集成电路 T_1 构成的放大器 K_4 共同完成的。

图十二(a)是移相器和放大器 K_4 的简化原理图。图中电阻 R 上的信号电压 U_R 输



图十一 (a) 驱动放大器输出波形
(b) 从检测压电晶体输出的波形



图十二 (a) 移相放大器原理图
(b) U_{in} 与 U_{out} 之间的相位关系

给 K_4 的同相端，电容 C 上的信号电压 U_C 输给 K_4 的反相端。放大器 K_4 对 U_R 和 U_C 都放大 K 倍，但相位却相反，这样一来，从 K_4 输出的信号 U_{out} 的相位就会超前于输入信号 U_{in} （见图十二(b)）。当调节电阻 R 使其阻值等于电容 C 的容抗时， U_{out} 就会超前 $U_{in} 90^\circ$ 。另一方面，由于 K_4 对 U_R 和 U_C 都放大同样倍数，所以不论相移是多少， U_{out} 的幅度都是 U_{in} 的 K 倍。因为粘在待测棒上的检测用的压电晶体是有极性的，所以当连接的极性改变时，图十一(b)的波形就要反相 180° ，这时激励方波和检测出的信号波形之间的相位关系将改变为前者落后于后者 90° 。为了适应这一变化，在移相器和放大器 K_4 之间加装了一个双刀双掷开关 K_1 。当出现上述情况时，只需把开关 K_1 反向拔转，相位关系就会从落后变为超前。

2、延时脉冲发生器

延时脉冲发生器的基本电路是一个单结晶体管振荡器，它由图八中的单结晶体管 T_{2a} 和电容 C_6 及电阻 R_{21} 、 R_{22} 、 R_{23} 、电位器 W_4 等组成。

延时脉冲发生器应当只在显示阶段才工作,而在激发、衰减、测量等阶段停止工作。为了控制它的工作状态,在电容 C_6 的两端并联了一个复合晶体管 T_{26} 、 T_{27} ,并将 T_{26} 的基极通过电阻 R_{17} 连接到与非门 T_{22} 的输出端,用 T_{22} 输出端电位来控制脉冲发生器的工作状态。

当仪器处在激发、衰减两个阶段时,与非门 T_{22} 输出高电位, T_{26} 和 T_{27} 管导通,电容 C_6 被短路接地,单结晶体管 T_{28} 不能振荡。

当仪器进入测量阶段后,与非门 T_{22} 连续输出正脉冲, T_{26} 和 T_{27} 管将电容 C_6 间断短路接地。由于正脉冲的重复周期远小于单结晶体管振荡器的脉冲重复周期,所以电容 C_6 上的电压在远没有升到单晶体管的峰点电压之前,就已因 T_{27} 管将电容 C_6 短路而降为零,这样单结晶体管 T_{28} 依然不能振荡。

当仪器转入显示阶段后,与非门 T_{22} 输出端稳定在低电位, T_{26} 和 T_{27} 管截止, C_6 不再被短路,于是单结晶体管电路开始振荡。

单结晶体管振荡器工作后,要先后发出两个指令脉冲,而这两个脉冲的时延是不同的。为了控制时延,在电阻 R_{22} 和电位器 W_4 两端并联了一个晶体管 T_{25} ,并将 T_{25} 管的基极通过 T_{24} 管连到 T_{30} 管的输出端。当 T_{30} 管输出高电位时, T_{24} 和 T_{25} 管导通,电阻 R_{22} 和电位器 W_4 被短路;当 T_{30} 管输出低电位时, T_{24} 和 T_{25} 管截止,电阻 R_{22} 和电位器 W_4 与电阻 R_{21} 串连起来。

在显示的初始阶段, T_{30} 管输出端处在高电位,单结晶体管振荡器的时间常数电路只包含一个低阻值电阻 R_{21} ,因此只需经过一段很短时间,电容 C_6 即被充电至 T_{28} 管的峰点电压,于是 T_{28} 管输出第一个负向指令脉冲。这个脉冲触发由与非门 T_{29} 和与非门 T_{30} 组成的双稳态电路 4 ,使 T_{30} 管输出端电位从高跳向低, T_{29} 管输出端电位从低跳向高。在这两个电位的双重作用下,单稳态电路 T_{32} 管(单 3)输出一个负向打印指令脉冲。 T_{30} 管输出电位降低后,电阻 R_{22} 和电位器 W_4 被串连接入时间常数电路,由于时间常数加大了,所以经过一个较长的延长时间(显示时间)之后,单结晶体管 T_{28} 才输出第二个负向指令脉冲,于是双稳态电路再次翻转, T_{30} 输出端跳回至高电位, T_{29} 输出端跳回至低电位。在这两个电位的双重作用下,单稳态电路 T_{31} 管(单 2)输出一个负向激发脉冲,开始了下一循环的测量。

为了能在测量开始前按需要预先调整好数码管的显示时间,可以通过“调整”键将 T_{26} 管基极对地短路。 T_{26} 管基极接地后延时脉冲发生器将连续工作,这时可将单稳态电路 T_{31} 管输出的等时间间隔负脉冲经过“调整”键输到单稳态电路单 5 的 T_{37} 管的输入端,这样接在 T_{38} 管集电极中的发光二极管 D_4 就会呈现等时间间隔的闪亮,而每两次闪亮之间的间隔时间就是数码管将要显示的时间。调节电位器 W_4 可以连续改变这个显示时间。

四、其它

激发待测棒所用的换能器可以使用线圈也可以使用压电晶体或是电容器板。

使用线圈时,线圈要装在由坡莫合金制成的 U 形铁心上,铁心的端面要靠近粘在待测棒端面上的坡莫合金片,两者之间要保持平行。线圈的圈数不宜过多,它的选择与棒

的谐振频率有些关系,其适用范围可由实验来决定。

如果使用压电晶体,压电晶体要粘在棒的中部。在激发过程中如果发现待测棒基频不易起振,可在驱动放大器与激发晶体之间接入一个简单的阻容滤波电路,调节滤波电路的时间常数适当地将激励方波的前后沿整圆滑,就可以激励起基波。

我们在实验中使用的检测换能器及激发换能器皆为锆钛酸铅压电陶瓷。为了减小换能器对 Q 值的影响,压电陶瓷的尺寸要尽量取得小一些,只要能满足从压电陶瓷取出幅度大于 3mV 以上的信号电压就可以了。

使用电容板激发待测棒对 Q 值的影响最小,但它的激发灵敏度较低,只有当棒的 Q 值较高时才宜使用。激发用的电容板要安装在靠近棒的端面处并与端面保持平行。

无论是用线圈激发还是用电容板激发,激发换能器都会对棒施加一个定向吸引力,这个吸引力会引起棒体摆动,严重时还会使 Q 值发生变化。如果想避免棒体摆动,就必须同时使用两个规格相同的换能器,两个换能器要分别摆在棒的两端,除了要与棒的端面平行外,距离也要相等。

本仪器除了能测量 Q 值之外,还可以配合数字频率计准确地测量待测棒的谐振频率,测量范围为 200 赫至 20 千赫。

测量时按下“调整”键,将 T_{26} 管基极短路接地(见图八),于是单稳态 T_{31} 管输出负激发脉冲,待测棒起振。由于这时鉴幅器 T_{13} 管的输入端被测量键短路接地,鉴幅器被封锁,棒的振动信号不能通过鉴幅器进入后面的控制电路,这样自激振荡就可以长期维持下去。这时将显示时间调节电位器 W_4 断开后,就可以用数字频率计从机后的插口测量与非门 T_{33} 的输出信号,从而得到棒的谐振频率。

参 考 文 献

- [1] 物理系引力波研究组,衰减时间测定仪研究,中山大学学报,1977,2,53—63.

Metering Instrument of Quality Factor Q of Gravitational Waves Antenna

Chen Jiayan Guan Tongren Yu Po

Abstract

The Q of gravitational wave antenna depend on the material property as well as external condition. In order to find out the relationship between the antenna Q and external condition automatical operating in succession is required. So that we have designed and made a metering instrument for quality factor Q.

The metering instrument of Q can measure Q of the metal cylinder and other material bar of highter Q. It can give data of the measurement at regular intervals as we desire.

Also, it can measure accurately the longitudinal fundamental mode frequency of the cylinder with a digital frequency meter record oscillating signal from metering instrument. Because the metering instrument excite free-vibration of the cylinder with free-running type and keep up the stationary amplitude for a long time.