

作。

### 三坐标测量装置的精度

测量装置在组装后实测精度的主要技术指标如表 1 所示。

测量杆在位于悬臂梁最长位置时, 测量其杆端振动情况如表 2 所示。

从实测数据可以看出, 其定位精度好于  $2.2 \times 10^{-4}$ , 霍尔片探头平面角度变化引起的磁场误差  $< 1 \times 10^{-4}$ , 测量探头每次停留时间为 1 s, 因此, 振动问题所引起的测量误差可忽略不计。

在研制过程中, 得到何多慧、孔德长(合肥机床修配厂)等同志的大力帮助。原子能所王传英同志、汪达基同志给予热心的鼓励和指导, 作者表示衷心的感谢。

表 2 测量杆移动时振动情况测试结果

测 量 位 置	电 机 传 动 测 量 杆		备 注
	开始时最大振幅, mm	刚停下时最大振幅, mm	
水 平 位 置	0.05	0.025	1. 测试时间在 1 s 内;
垂 直 位 置	0.01	0.005	2. 用丹麦振动仪测

### 参 考 文 献

- [1] J. Billan et al., Proc. 4th Int. Conf. on Mag. Tech., Brookhaven, 1972, p. 779.  
 [2] O. Szevits et al., Seventh International Conference on Cyclotrons and their Applications, 1975, p. 184.  
 [3] Charles G. Dols, Proc. 4th Int. Conf. on Mag. Tech., Brookhaven, 1972, p. 791.

(编辑部收到日期: 1981年6月29日)

## 微秒矩形脉冲顶部抖动测量

潘 龄 鹤 曹 德 彰

(关键词 脉冲顶部抖动测量、切割联合示波器方法、校正、误差)

### 一、导 言

速调管电压脉冲顶部的变化会引起微波输出相移, 影响束特性。因此, 电子直线加速器对调制器输出脉冲顶部平坦度提出严格要求。

测量脉冲顶部特性的方法有多种。例如利用场致发射二极管测量高压矩形脉冲顶部电压的微小变化<sup>[1]</sup>; 利用 Kerr 效应测量高压脉冲绝对值及确定脉冲形状<sup>[2,3]</sup>等。但这些方法所需测量系统和技术都较复杂。脉冲高压经分压器衰减后直接送入示波器的测量方法虽简单, 但由于脉冲顶部抖动值仅占脉冲幅值的很小部分, 很难精确地测出。我们采用脉冲切割联合示波器的方法, 即利用偏压二极管对输入脉冲进行切割, 将切割后的小幅度脉冲送入示波器, 经放大后进行测量的方法。这样不仅可以测得脉冲顶部抖动(包括顶降)值,

而且可以在示波屏上显示出脉冲顶部的实际波形；同时也为调制器成形网络的实验调整提供准确的依据。

## 二、工作原理及测量系统

脉冲顶部抖动系数：

$$\eta = \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

要测得  $\eta$ ，需测量顶部抖动值  $\Delta V$  及输入脉冲的原始幅值  $V$ 。

脉冲顶部抖动测量系统如图 1 所示。偏压源  $V_B$  采用放在一个独立屏蔽盒中的电池组。偏压微调可达毫伏量级。

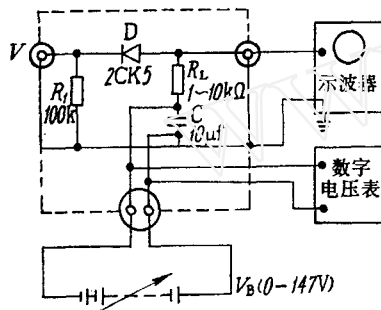


图 1 顶部抖动测量系统

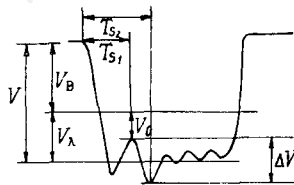


图 2(a) 待测脉冲波形

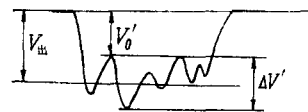


图 2(b) 示波屏上测得的波形

待测脉冲属单向脉冲链（如图 2 所示）。当脉冲通过图 1 电路时，只有超过偏压的部分才可通过二极管，这样就将脉冲大部分切割掉，只留脉冲顶部输出。为得到脉冲顶部的最高观测精度，可以调节直流偏压电平、示波器衰减档和垂直位置，使在示波屏上尽可能大而清晰地显示出顶部抖动波形，并测得经放大后的微小抖动值（见图 3）。

测量时，先选择好工作点（一般为满足平顶宽度要求的顶部抖动最低点），从示波屏上测得工作点电压  $V_0'$ 。然后如上述，仅让放大后顶部波形显现在示波屏上，并测得此时工作点与抖动最高点之间的电压值  $\Delta V'$ ，即顶部抖动值。此时脉冲幅度中值为：

$$V' = V_B + (V_0' + \frac{1}{2} \Delta V') \quad (2)$$

若  $\Delta V'$ ， $V'$  经校正后（详见下述）分别为  $\Delta V$ ， $V$ ，则

$$\eta = \frac{\Delta V}{V}$$

## 三、产生误差的因素及校正方法

**1. 二极管非线性的影响及参数考虑** 二极管非线性引起波形畸变，主要是由于二极管动态电阻相对于源或负载阻抗不可忽略并随通过的电压大小而变化所造成。

从减小二极管非线性影响角度看，希望切割后脉冲幅度大；但从提高输出波形在示波屏上观测精度看，又希望切割后脉冲幅度小，这就需要进行折衷考虑。

解决这一问题，除正确选择工作点使脉冲工作于动态电阻近似线性区域外，还必须采取相应校正措施。

可以预先利用高精度脉冲产生器和高分辨率示波器测定精确的输入-输出特性曲线(图4)。显然,随电压的变化,工作点沿曲线的变化是连续的。由顶部抖动实测值  $\Delta V'$  通过图4曲线可求得实际的顶部抖动值  $\Delta V$ 。这样借助校正曲线消除了二极管非线性对测量的影响。由于精密脉冲产生器精度可达 0.1 mV,作校正曲线带来的误差主要是示波器观测误差(25 mV)。经校正后(2)式为:

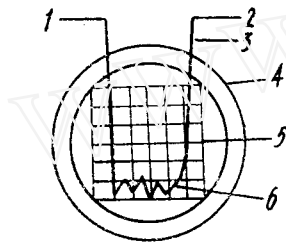


图3 得到示波器最高分辨率原理图  
1——脉冲扫迹从示波屏上可观察区域移走;  
2——直流电平处;3——切割后脉冲;4——示波屏;5——示波屏栅线;6——脉冲顶部。

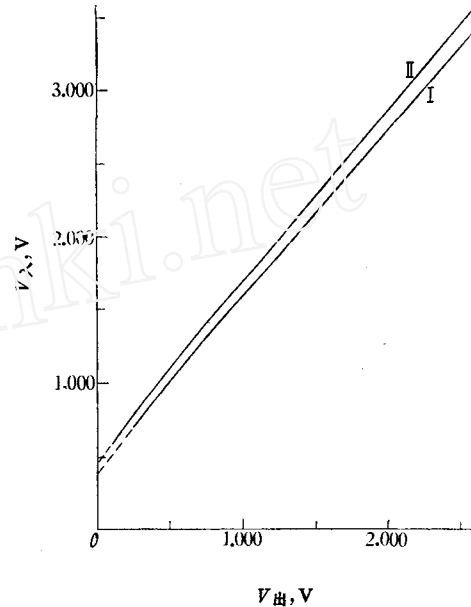


图4  $V_L \sim V_B$  特性曲线  
I—— $R_L = 9.99 \text{ k}\Omega$ ; II—— $R_L = 1.000 \text{ k}\Omega$ 。

$$V = V_B + (V_0 + \frac{1}{2} \Delta V'), \quad (4)$$

其中  $V_0$ ,  $\Delta V$ ,  $V$  分别是  $V'_0$ ,  $\Delta V'$ ,  $V'$  经校正后的值。

负载电阻  $R_L$  大小直接关系到工作点的选择。为使  $R_L C$  时间常数大,要求  $R_L$  大;同时为能适应各种信号源也希望  $R_L$  大。但  $R_L$  又不可太大,否则流过二极管电流减小,工作点非线性影响增大。

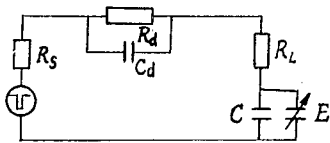


图5 二极管电容影响的等效电路



图6 二极管电容对波形的影响

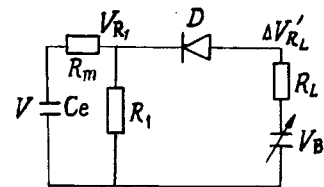


图7 电容分压器接入测量电路后的等效电路  
 $R_1$ ——为避免由于二极管的存在在  $C$  上造成电荷积累而加的放电电阻;  
 $C_e$ ——电容分压器低压端等效电容;  
 $R_m$ ——匹配电阻。

二极管电容对波形也有影响。如图5所示,在脉冲前沿和后沿部分,由于二极管处于不导通状态,脉冲将通过电容  $C_d$  耦合到  $R_L$  上形成微分信号。如图6,在波形前沿起始部分和后沿末端形成尖峰。它的大小与  $R_L$  有关。这一尖峰越小越好,因此也希望  $R_L$  小些。

二极管导通后  $C_d$  作用可忽略, 故对顶部测量影响很小。

电容  $C$  为脉冲形成通道, 又为二极管提供偏压。要求  $C$  容量足够大, 使  $C$  在脉冲期间可看作短路。计算表明, 脉冲期间  $C$  上的充电并不影响测量精度 (当脉冲宽度为  $3 \mu\text{s}$ , 脉冲重复频率 300 次/秒时, 对测量误差的影响为  $0.1\%$ )。

**2. 高压经电容分压器衰减后测量的问题** 在某些使用电容分压器作为高压衰减器的场合, 必须考虑由于接入测量电路带来终端有限负载问题, 它将造成一定顶降。其等效电路如图 7 所示。

显然在脉冲期间存在两条放电通道。一是  $C_e$  上电压  $V$  通过  $R_1$  放电。当  $R_1 \gg R_m$ ,  $T_s \ll R_1 C_e$  时 ( $T_s$  为测量点离脉冲前沿时间), 放电造成的结果近似为:

$$\frac{V_{R_1}}{V} = 1 - \frac{T_s}{R_1 C_e},$$

即 
$$V = \frac{V_{R_1}}{1 - \frac{T_s}{R_1 C_e}}. \quad (5)$$

另一放电通道是  $C_e$  上电压超过偏压部分对  $R_2$  放电 ( $R_2 = R_d + R_L + R_m$ )。当  $T_s \ll R_2 C_e$  时, 造成结果近似为:

$$\Delta V_{R_1} = \frac{\Delta V_{R_L}}{1 - \frac{T_s}{R_2 C_e}},$$

$\Delta V_{R_L}$  为  $\Delta V'_{R_L}$  经二极管非线性校正后的值。

$$\therefore V_{R_1} = V_B + \Delta V_{R_1}.$$

上两式代入 (5) 式得:

$$V = \left( V_B + \frac{\Delta V_{R_L}}{1 - \frac{T_s}{R_2 C_e}} \right) / \left( 1 - \frac{T_s}{R_1 C_e} \right). \quad (6)$$

如工作点和抖动最高点离前沿时间分别为  $T_{s_1}$ ,  $T_{s_2}$ , 对  $V$ ,  $\Delta V$  尚需按下式再进行一次校正。

抖动值:

$$\begin{aligned} \Delta V_T = & \left( \frac{V_0 + \Delta V}{1 - \frac{T_{s_2}}{R_2' C_e}} + V_B \right) / \left( 1 - \frac{T_{s_2}}{R_1 C_e} \right) \\ & - \left( \frac{V_0}{1 - \frac{T_{s_1}}{R_2' C_e}} + V_B \right) / \left( 1 - \frac{T_{s_1}}{R_1 C_e} \right); \end{aligned} \quad (7)$$

输入幅值:

$$\begin{aligned} V_T = & \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{V_0 + \Delta V}{1 - \frac{T_{s_2}}{R_2' C_e}} + V_B \right) / \left( 1 - \frac{T_{s_2}}{R_1 C_e} \right) \right. \\ & \left. + \left( \frac{V_0}{1 - \frac{T_{s_1}}{R_2' C_e}} + V_B \right) / \left( 1 - \frac{T_{s_1}}{R_1 C_e} \right) \right]; \end{aligned} \quad (8)$$

抖动系数 
$$\eta = \frac{\Delta V_T}{V_T}. \quad (9)$$

其中,  $R'_2 = R_L + R'_d + R_m$ ,  $R'_2 = R_L + R'_d + R_m$ ,  $R'_d$ ,  $R'_d$  分别是工作点及抖动最高点电压下二极管电阻。

**3. 观测误差** 影响测量精度的另一重要因素是示波器的观测误差。若测量时所用示波器衰减档之灵敏度为  $x$  (V/cm), 示波器扫迹宽度为 1 mm, 则由于边缘不清带来误差为  $\pm 0.5$  mm。示波器观测误差为:

$$y = x(\text{V/cm}) \times (0.5 \text{ mm} + 0.5 \text{ mm}) = 100 x \text{ mV}. \quad (10)$$

**4. 其它因素** 为减小外电路影响, 整个测试电路装于小屏蔽盒内(图1虚线)。应仔细安排元件, 使各部分引线尽可能短, 分布电容尽可能小, 以避免高频失真。信号输入输出均采用同轴接头。测试时, 测试电路应尽可能靠近示波器以防止由于测试电路与示波器之间连接电缆带来的影响。示波器频宽应大于 50 MHz, 扫迹细而清晰, 放大器线性好, 衰减档失真小。

#### 四、误差计算

由(1)式根据误差定理

$$\eta = \frac{\Delta V}{V} \left\{ 1 \pm \left[ \left| \frac{d(\Delta V)}{\Delta V} \right| + \left| \frac{dV}{V} \right| \right] \right\}. \quad (11)$$

由上式,  $\eta$  的误差由两部分组成。前一项表示顶部抖动值测量的相对误差, 后一项为脉冲幅值测量的相对误差。鉴于已经过二极管非线性及使用电容分压器等的影响的校正, 带来误差主要因素为示波器观测误差。由(10)式可得:

**1. 顶部抖动值误差 A** ① 选择工作点带来误差  $A_1 = 50 a \text{ mV}$ ; ② 观测顶部抖动值误差  $A_2 = 100 b \text{ mV}$ ; ③  $V_\lambda - V_\mu$  曲线带来的误差  $A_3 = 25 \text{ mV}$ 。a, b 分别为测量时所用示波器之灵敏度(V/cm),

$$\therefore A = A_1 + A_2 + A_3 = (50 a + 100 b + 25) \text{ mV}. \quad (12)$$

**2. 脉冲幅值测量误差 B** 由(4)式, B 包括: ①  $V_B$  测量误差  $B_1$ 。所用五位数字电压表精度为 0.05%,  $B_1 = V_B \times 0.05\% = 0.5 V_B \text{ mV}$ ; ②  $V_0$  测量误差。  $B_2 = A_1 + A_3 = (50 a + 25) \text{ mV}$ ; ③  $\frac{1}{2} \Delta V_\lambda$  测量误差  $B_3 = \frac{1}{2} A$ 。

$$\therefore B = B_1 + B_2 + B_3 = (0.5 V_B + 75 a + 50 b + 37.5) \text{ mV}. \quad (13)$$

$$\text{由(11)-(13)} \quad \eta = \frac{\Delta V}{V} \left[ 1 \pm \left( \frac{A}{\Delta V} + \frac{B}{V} \right) \right]. \quad (14)$$

在使用电容分压器场合:

$$\eta = \frac{\Delta V_T}{V_T} \left[ 1 \pm \left( \frac{A}{\Delta V_T} + \frac{B}{V_T} \right) \right]. \quad (15)$$

在一般情况下, (14), (15)式中第二项可忽略。

#### 五、测量实例及讨论

速调管 152 kV 高压经电容分压器衰减后测量结果如下。

从示波器上测得:

$$V'_0 = 1.525 \text{ V}, \Delta V' = 0.48 \text{ V}, T_{s_1} = 0.5 \mu\text{s}, T_{s_2} = 0.8 \mu\text{s}.$$

利用校正曲线(4)得:

$$V_0 = 2.303 \text{ V}, \Delta V = 0.555 \text{ V};$$

$$V_B = 71.88 \text{ V}, R_L = 1.000 \text{ k}\Omega, C_e = 22000 \text{ pF}.$$

利用(7), (8), (12), (13)及(15)式可得:

$$\Delta V_T = 0.60 \text{ V}, V_T = 74.54 \text{ V}, A = 65 \text{ mV}, B = 121 \text{ mV},$$

$$\eta = \frac{8}{1000} \left[ 1 \pm \frac{11}{100} \right].$$

$\eta$  为顶部宽度  $1.93 \mu\text{s}$  的顶部抖动系数。

测量方法适用于微秒矩形脉冲。当脉冲工作比比较小时( $< \frac{1}{1000}$ ), 测量不受工作比影响。不同脉冲幅值下测量精度不同。对于数十伏到一百多伏幅值的脉冲测量精度较高。同时, 本文也提供了一种较精确的微秒矩形脉冲幅度的测量方法。

### 参 考 文 献

- [1] A. A. Дульзон и др., ПТЭ, 6, 105 (1969).
- [2] D. C. Wunsch & A. Erteza, Rev. Sci. Instrum., 35, 816 (1964).
- [3] S. Y. Ettinger & A. C. Venezia, Rev. Sci Instrum., 24, 221 (1963).

(编辑部收到日期: 1981年11月2日)

## Calutron 源 引 出 电 极

吴建华 万春侯 李增普 李淑媛

(关键词 Calutron 源、钨棒电极、铷、钾、钹、铯)

### 一、前 言

在所有产生带电粒子束的系统中, 为了得到聚焦良好的带电粒子束, 引出电极的几何形状、几何参数等几何条件, 对于带电粒子束的品质是很重要的。

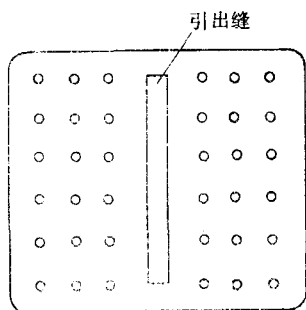


图 1 不锈钢引出电极示意图

在利用电磁法达到同位素分离目的的同位素电磁分离器中, 离子源(称 Calutron 源)中离子束的引出是由一个用不锈钢或石墨做的“正-负-地”的三电极系统来完成的。此种电极不仅加工成形复杂, 损耗快, 而且由于几何条件不合适, 对提高某些同位素的产量和丰度会产生不利因素, 特别是对碱金属元素和稀土元素, 其影响更为显著。因为电极气阻面积较大(见图 1), 使存在于正、负电极间的中性原子形成了一个高气压区, 这些中性原子与引出离子束发生电荷交换, 对引出束产生散射, 从而

对引出束产生散射, 从而