

核物理电子仪器

下 册

A. A. 薩 宁 著
張 万 鑄 等 譯

人 民 教 育 出 版 社

53.83/
794
:2

核 物 理 电 子 仪 器

下 册

A. A. 薩 宁 著
張 万 鑄 等 譯

人 民 出 版 社

本书是根据苏联国家物理数学书籍出版社出版的薩宁 (А. А. Санин) 所著“核物理电子仪器”(Электронные приборы ядерной физики) 一书 1961 年版譯出的。

本书中譯本分上下两册出版, 本册为下册, 包括定标綫路; 計数率計; 电压脉冲的幅度分析方法; 時間分析器。书末附有本册引用的文献, 并附有一些苏联制造的常用电子仪器、电子管和电子学元件的参考資料。

本书可作为高等学校有关专业的教学参考书, 对实验物理工作者及其他有关研究和生产部門的工作人員也有参考价值。

核物理电子仪器

下 册

А. А. 薩 宁 著

張 万 鏞 等 譯

北京市书刊出版业营业許可証出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人 民 教 育 印 刷 厂 印 装

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 經 售

統一书号 K13010·1096 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 7 $\frac{1}{2}$ 插頁 1

字数 143,000 印数 2,501—6,500 定价(7) ¥0.90

1963 年 6 月第 1 版 1963 年 12 月北京第 2 次印刷

下 册 目 录

第十三章 定标线路	1
§ 1. 定标线路的基本参量	1
§ 2. 电子管定标单元	5
§ 3. 定标单元的触发方法, 二进位定标线路	16
§ 4. 准确计数的指示	22
§ 5. 十进位定标线路	25
§ 6. 分辨时间小的电子管定标单元	38
§ 7. 十进位管定标线路	41
§ 8. 带状电子束计数管	48
§ 9. 磁旋管	53
§ 10. 改变被记录信号时间分布的线路	58
第十四章 计数率计	62
§ 1. 计数率计的工作原理及其最简单的线路	62
§ 2. 具有定量电容器的计数率计	67
§ 3. 具有定量电容线路的测量准确度和测量时间	70
§ 4. 大时间常数的计数率计	73
§ 5. 计数率计的电子管伏特计	76
§ 6. 对数刻度的计数率计	84
第十五章 电压脉冲的幅度分析方法	87
§ 1. 甄别器的基本特性	87
§ 2. 二极管甄别器	89
§ 3. 其他的积分甄别器线路	92
§ 4. 高灵敏度的甄别器	104
§ 5. 微分甄别器	106
§ 6. 幅度分析器的基本参量	116
§ 7. 带有阈设备的幅度分析器	118
§ 8. 幅度-时间变换分析器	132
§ 9. 带仿真延迟线的幅度分析器	143
§ 10. 具有铁淦氧磁心矩阵的幅度分析器	152
§ 11. 应用电子束存储管的幅度分析器	174
§ 12. 脉冲谱仪	185

第十六章 時間分析器	191
§ 1. 中子机械選擇器	191
§ 2. 沒有專門存儲設備的時間分析器	193
§ 3. 帶有存儲設備的時間分析器	201
参考文献	206
附录	213
汉俄詞汇对照表	234

第十三章 定标綫路

§ 1. 定标綫路的基本参量

各种計数系統,像放大設備一样,在核物理中同样得到了广泛的应用。任何輻射探测器产生的脉冲数目与通过它的核粒子数目都存在一定的关系。由于样品放射性的强弱、样品到輻射探测器的距离及探测器性质的不同,单位時間內的脉冲数目可以在很大範圍內变化。

計数系統在核物理中不仅用来記錄輻射探测器所产生的脉冲数目,还可以用来記錄符合的数目、反符合的数目、幅度甄别器輸出的脉冲数目以及許多其他情况下的某种数目。

計数系統可以用来記錄在時間上是平均分布的或者是統計分布的电压脉冲。

我們来討論一下表明計数設備特性的参量。計数設備的基本特性是分辨時間。綫路能分开記錄两个相邻脉冲之間的最小時間称为分辨時間 τ_p 。如果脉冲間的時間間隔小于計数綫路的分辨時間 τ_p ,那么它們将被綫路作为一个信号記錄下来。

計数設備的另一重要参量是,在单位時間里它能无遺漏地記錄下的周期脉冲的最大数目。

計数系統的灵敏度定义为所記錄的輸入信号的最小幅度。

和其他任何电子設備一样,表明計数綫路特性的有电子管数和电源消耗的电流。

計数系統的可靠性是它的重要特性。通常采用以电子綫路来稳定輸出电压的电源供給計数設備的板极电路和偏压电路。而供

給計數綫路电子管灯絲的电压是未經稳定的。所以使电网电压改变 $\pm 10\%$ 来檢驗綫路的工作是很重要的。上面所指的电网电压的改变数值是任意举出的。不过在实际上, 电网电压的变化一般不超过上面指出的数值。

在使用計數綫路时, 讀数方便是很重要的。它的容量同样也很重要。所謂計數綫路的容量就是綫路所能計录的最大脉冲数目。

在目前拟制了大量的計數系統, 它們的工作原理是很不相同的。用电子管做成的計數綫路得到了最广泛的应用。这种綫路的最小分辨時間大約等于 2.5×10^{-9} 秒。基于各种不同的原理, 可以用普通的电子管拟制各种計數綫路。我們将在下面討論这些原理中的某些原理。

为計數綫路專門制造了一系列真空器件, 像磁旋管、带状电子束管和十进位管。用磁旋管做成的計數綫路的最小分辨時間約等于 0.1 微秒。但是一般的磁旋管綫路的分辨時間是在 1—2 微秒附近。带状电子束管綫路的分辨時間在 10 微秒左右。用十进位管做成的計數綫路的分辨時間取决于管子的类型, 通常等于 50—100 微秒^①。

計數設備通常可以分为三个主要部分: 輸入脉冲甄別器、定标綫路和机械計數器。通常用某一系数——定标率 N 表示定标綫路的特性。这个系数表示, 为了要在輸出端得到一个脉冲时必须加在定标綫路輸入端的信号数目。从定标綫路輸出端出来的信号加到使机械計數器动作的电子設備上。为了确定加到計數設備輸入端上的全部脉冲数目, 必須把机械計數器的讀数乘上定标率 N 。这样得到的数目可能比加到綫路輸入端的脉冲数目少了 $N-1$ 个,

① 目前制出了分辨時間近 2 微秒的十进位管。

因为机械計数器是在每第 N 个脉冲来时才記錄一个数。为了准确地确定加到計数綫路輸入端的全部脉冲数目，在計数綫路內应預先装有專門的插入設備(интерполирующее устройство)。

如果机械計数器所指的数目为 x ，而插入設備所指的数目是 y ，則綫路記下的总脉冲数目

$$M = xN + y. \quad (13.1)$$

計数設備常常用来記錄按時間是統計分布的脉冲。在記錄这种信号时，永远存在某种几率，即两个脉冲之間的時間間隔可能小于計数綫路的分辨時間。所以，輸入信号的某一部分将被漏記。为了确定全部的脉冲数目，必須对漏記进行校正。未被記錄的信号数目决定于在单位時間內加到綫路輸入端的脉冲平均数目 n 以及綫路的分辨時間 τ_p 。脉冲在時間間隔 τ_p 里出現的几率等于 $n\tau_p$ （这在 $n\tau_p \ll 1$ 时是正确的）。在单位時間內(1秒)綫路記錄的脉冲的平均数

$$n_s = n(1 - n\tau_p). \quad (13.2)$$

假設，加到定标綫路輸入端的脉冲平均数目每秒等于 10^4 个，而定标綫路的分辨時間等于一微秒。由关系式(13.2)不难确定未被綫路記錄的信号数目等于 1%。

如用机械計数器記錄信号，則記錄按時間平均分布的信号时，所允許的最大計数速度不仅取决于計数設備的分辨時間。实际上，这时可能是机械計数器的分辨時間限制了允許的最大平均計数速度。

可以用普通的电话計数器来計数。这种計数器的分辨時間大約等于 0.04—0.1 秒。如果在計数器中采用比較有彈性的回动彈簧，分辨時間可以减少一些。电话計数器的繞組阻抗是不大的，所以它只有和功率管或閘流管連用时才能圓滿地工作。如果用比較細的导綫重新繞制电话計数器的綫圈，則它的工作电流可以减少。

通常采用直径为 0.05 毫米的导线来重绕线圈, 并且绕组的直流电阻做的大约等于 15 千欧。重绕的线圈的电感量很大, 因此在流过绕组的电流有急剧的变化时, 在绕组的引出端上可能产生高压, 这个高压有可能击穿绝缘。当计数器工作时, 减少计数器绕组上高压的有效方法之一是, 在线圈的引出端上并联一个由 0.1 微法的电容和一千欧电阻串联的电路。有专门记录脉冲的机械计数器。这些计数器中的某些类型有很小的分辨时间 (5×10^{-4} 秒)。大大地减少机械计数器的分辨时间, 通常会使其的结构复杂化, 因此, 也使它的工作可靠性变坏。所以, 实际上分辨时间很小的机械计数器用的比较少。获得最广泛应用的机械计数器 CB-1 的分辨时间是 10^{-2} 秒。它的容量是一万个脉冲。计数器的读数能否还原到零是它十分重要的特性。在普通的电话计数器里没有这种装置。这样就很难把它用来记录多道系统 (例如幅度分析器) 里的脉冲。

在 CB-1 计数器中, 预先考虑了调节读数到零的可能性。但是调节这种计数器的读数到零的过程, 本身就占有一段长的时间, 所以把这种计数器应用到多道系统中同样是不方便的。

有一些机械计数器带有电动读数还原装置。但是还原读数的装置所消耗的电流很大, 所以, 在任何的电子学系统中, 当这种计数器数量很多时, 供给它的电源就变得过于笨重。

机械计数器的主要缺点是, 寿命较短; 在工作中不够可靠。因此, 完全可以理解为什么许多生产的工厂企图排除计数设备中的机械计数器。近几年来, 许多计数设备的输出端是没有机械计数器的。这时定标设备的定标率应大约等于机械计数器的容量, 也就是说大约为 10^4 — 10^5 。在没有机械计数器的计数系统中, 通常采用十进位的定标线路。因为它可以比较方便地计算读数。新的真空器件如带状电子束管、十进位管和某些型号的磁旋管, 本身

就有能指示状态的机构，而且用这些器件所制成的线路是十进位的。

用电子管做成的线路一般是二进位的。但是，在这些线路中利用反馈电路以后，可以把二进位变成十进位。电子管定标线路的一个缺点是，和线路一起必须使用氖泡或者是微安表做为指示的附加系统。高度的可靠性和分辨时间比较小则是这种线路的主要优点。

§ 2. 电子管定标单元[1-9]

M. A. 邦奇·勃鲁耶维奇(Бонч-Бруевич)单元[伊克勒斯-约尔丹(Eccles-Jordan)单元]或者称为双稳态系统是大多数电子管定标线路的基本元件。在图 200 上示出用两个三极管做成的最简单的定标单元线路。在这个

线路中有两个直耦合，以保证两个稳定状态。其中一个稳定状态对应于电子管 Π_1 截止和电子管 Π_2 导电；而另一个稳定状态与此相反，即对应于电子管 Π_2 截止和电子管 Π_1 导电。线路的参量是对称的，即 $R_{a1} = R_{a2} = R_a$, $R_{c1} = R_{c2} = R_c$, $R_{n1} = R_{n2} = R_n$ 。电

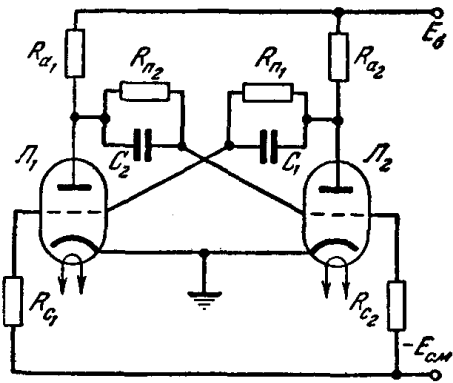


图 200. 定标单元线路。

子管是同一型号的。当线路接通时，由于线路的参量或者电子管特性的某些不对称，流过两个电子管的电流可能不同。甚至在线路元件和电子管的参量是理想对称时(实际上这是不可能的)，散粒效应也能使流过两个电子管的电流有所差别。这样，当线路接通时，电子管板极上的电压就不相同。由于正反馈的作用，定标单

元翻轉并过渡到某一稳定状态。綫路可以在这个状态停留任意长的時間。加入触发脉冲可以改变綫路的状态。由一个状态向另一状态过渡是在某一有限時間內完成的,所以,定标单元具有一定的分辨時間。要能实现再生过程,必須滿足关系式

$$K \frac{R_c}{R_c + R_n} > 1. \quad (13.3)$$

綫路的参量总可以选择得使一个电子管(例如 J_1)导电时,另一个电子管(J_2)的控制栅极上的电压低于截止电压。因为电源电压不大的变化不会引起綫路翻轉,所以定标单元的每个状态都是稳定的。适当地选择截止管控制栅极上的偏压或使导电电子管有不大的栅流,可以保证定标单元的状态稳定。第二种方法較差,因为它使单元的快动作变坏。但是第二种方法得到了較广泛的应用,因为在这种情况下綫路的工作是比較可靠的。并联在过渡电阻 R_{n1} 和 R_{n2} 上的电容器保证了把一个电子管板极上快变化的电压傳到另一电子管的控制栅极上。实际上,在沒有这些电容时,控制栅极上的电压将被积分。

我們来討論一下計算定标单元元件的原則[2]。这种綫路的完全的計算是很复杂的。但是,可以做一些簡化。在一級近似的情况下,从簡化計算所得出的一些結論是正确的。假設,定标单元电子管的截止和导电是瞬时完成的,而所有过渡过程决定于和电子管板极相連的全电容和某一等效电阻 $R_{\text{экв}}$ 。当电子管截止时,等效电阻的大小取决于板极負載。如果这个电子管导电,那么等效电阻

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_a R_n}{R_a + R_n}.$$

当然,当定标单元工作时,两个电子管的控制栅极上沒有瞬时的阶跃电压。如果考虑到电子管控制栅上的电压变化需要一定时

間，那么所得到的上升時間要比由簡化計算所得到的稍大些。由于簡化計算所产生的誤差不是很大的，所以对大多数的实际应用可以不考虑这一誤差。在簡化計算时，电子管可以用某一电阻 R_n 和开关 K 代替(图 201)。如果开关 K 关上足够长的時間，則在电子管的板极上将建立起电压

$$E_n = \frac{R_n}{R_a + R_n} E_0, \quad (13.4)$$

这里 R_n 是电子管在控制栅上偏压等于零时的內阻。这个电阻大約等于电子管的直流內阻。

我們来討論一下，当电子管导电时电子管板极上电压是如何变化的。这相当于在等效电路中开关 K 关上。根据克希荷夫定律，对于图 201 电路下面的关系式是正确的：

$$E_0 = R_a i + E,$$

$$i = i_1 + i_c,$$

$$\text{故} \quad \frac{E_0}{1 + \frac{R_a}{R_n}} = R_{\text{экв}} C_n \frac{dE}{dt} + E,$$

$$\text{其中} \quad R_{\text{экв}} = \frac{R_a R_n}{R_a + R_n}.$$

解这些方程式得到：

$$E = E_0 \left(\frac{R_n}{R_a + R_n} + \frac{R_a}{R_a + R_n} e^{-\frac{t}{R_{\text{экв}} C_n}} \right). \quad (13.5)$$

在这种情况下，电子管板极上电压变化的時間常数

$$\tau = \frac{R_a R_n}{R_a + R_n} C_n$$

如果电子管截止，那么在它的板极上的电压将按另一規律变化：

$$E = E_0 \left(1 - \frac{R_a}{R_a + R_n} e^{-\frac{t}{R_a C_n}} \right). \quad (13.6)$$

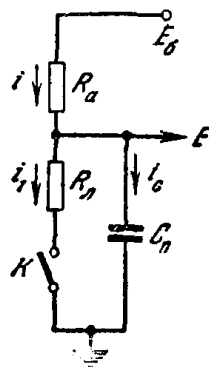


图 201. 在换向情况下电子管工作的等效电路。

这时, 电容器充电的时间常数 $\tau_3 = R_a C_{\text{no}}$ 。从关系式(13.5)和(13.6)可以看出, 全电容的充电和放电的时间常数是不同的。因此, 电子管板极上电压上升沿的时间要大于下降沿的时间。经过大约 $t = 5\tau$ 的时间, 板极上的电压已经稳定并在下一个触发脉冲到来之前, 不再变化。

实际上, 定标单元电子管板极上电压的上升时间和下降时间之差并不像从关系式(13.5)和(13.6)所得出的那样大。这是由于在进行计算时, 假定电子管控制栅极上的电压是阶跃变化的, 而实际上, 这个电压的改变需要一些时间。

进行线路计算时, 未知量如下: 电阻 R_a, R_c, R_n, R_k ; 电压 $E_c, E_{a_0}, E_{c_0}, E_{c_1}, E_{a_1}, E_k$; 电流 $i_{a_1}, i_{a_2}, i_1, i_2$ 。每个量的意义示于图 202 上。仅需给出所列数值中的一半, 就可由克希荷夫方程式解出另一半的数值。

在计算定标单元的元件时, 首先选择板极负载的数值。通常是

根据所需的输出信号幅度来选择 R_a 。如果定标单元中所用的电子管型号是给定的, 那么决定板极负载的大小就很容易。但是, 这时必须顾及到输出信号的最大允许上升时间。这样, 板极负载电阻不能大于某一最佳数值 R'_a 。定标单元输出的信号或者是加到下一个定标单元上或是加到任何其他设备上^①。任何一

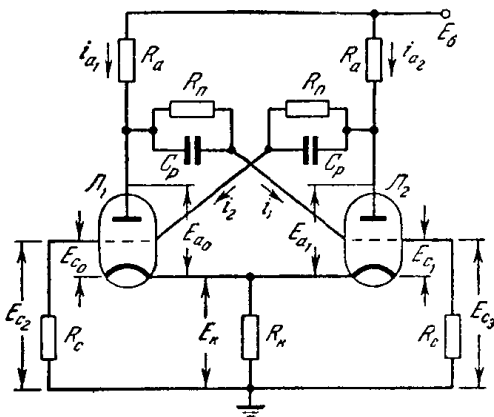


图 202. 有阴极电阻的定标单元线路。

① 在某些线路里, 信号是从部分板极负载上取出的。这时上述计算是不正确的。

个设备都有某一输入电阻 R_{BX} 和输入电容 C'_{BX} 。所以, 在计算电压的上升时间时, 必须考虑 R_{BX} 和 C'_{BX} 对电阻 R 和板极电路的全电容 C 的影响:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R'_a} + \frac{1}{R_{\text{BX}}}$$

或

$$R = \frac{R'_a R_{\text{BX}}}{R'_a + R_{\text{BX}}},$$

而

$$C = C_{\text{II}} + C'_{\text{BX}}$$

在板极上过渡过程的时间

$$\tau_a = 5RC,$$

由此

$$R_a \ll R'_a = \frac{R_{\text{BX}} \tau_a}{5R_{\text{BX}} C - \tau_a}. \quad (13.7)$$

因此, 选择板极负载的数值是与电源电压和触发信号的幅度无关的。

板极电流的大小可以由输出信号的幅度求出

$$i_{a1} > \frac{E_{\text{BHX}}}{R_a}. \quad (13.8)$$

假设, 在图 202 上电子管 J_1 是导电的, 而电子管 J_2 是截止的。通常流过分压器 $R_{\text{II}} - R_c$ 的电流 i_1 (图 202) 不超过板极电流 i_{a1} 的 10—20%。所以认为

$$i_{a1} = (1.1 - 1.2) \frac{E_{\text{BHX}}}{R_a} \quad (13.9)$$

是足够准确的①。

① 如果实际上流过分压器的电流小于板流的 10—20%, 则输出信号的幅度就略大于由计算所得的信号幅度。

然后由电子管板极特性曲线确定 E_{a_0} 的数值。 E_{a_0} 对应于当 $E_{c_0}=0$ 时由关系式 (13.9) 求得的 i_{a_1} 值。这时需要检验电子管板极上消耗的功率是否超过允许值。如果超过了, 必须选择另一种类型的电子管以满足这个条件。

截止管控制栅极上的电压 E_{c_1} 同样应该由板极特性曲线决定。但是, 截止管板极上电压 E_{a_1} 的数值目前还是未知的, 这个数值可由下面的等式选定:

$$E_{a_1}^* = E_{a_0} + 1.2E_{\text{вкл.}}$$
(13.10)

根据板极特性曲线选择 E_{c_1} 的数值, 使得当板压为 $E_{a_1}^*$ 时电子管是截止的。

R_c 是最后一个未知量, 通常 R_c 的数值不超过 100—200 千欧姆。如果 R_c 的数值过小, 那么流过分压器的电流将过大而使电源功率消耗过多。如果 R_c 过大, 则在分压器的电阻选择得不够精确时, 输出信号上升沿的斜率将会减小。

这样, 已选出的是下列数值: 电子管 J_1 的板极电压 E_{a_0} , 电子管 J_1 的栅极电压 $E_{c_0}=0$, J_1 的板极电流 i_{a_1} , J_2 管的栅极电压 E_{c_1} , 流过电子管 J_2 的板极负载的电流 $i_{a_2}=0$, 板极负载 $R_{a_1}=R_{a_2}=R_a$, 栅极电阻 $R_{c_1}=R_{c_2}=R_{c_0}$ 。余下的未知数值是: 阴极电阻 R_k , 过渡电阻 $R_{n_1}=R_{n_2}=R_n$, 电源电压 E_0 , 阴极电压 E_k , 电流 i_1 和 i_2 。

通常电源电压 E_0^* 由整流器供给。但是, 由计算所得的电源电压 E_0 的数值可能与给出的 E_0^* 数值不同。这不是计算的重要缺点, 因为总可以与定标单元串联接入限流电阻 R , 以使得在它上面的压降等于 $E_0^* - E_0$ 。对于某些定标线路, 必须接入上述的附加限流电阻。

假设, 定标单元处于这样的情况, 即第一个电子管 J_1 导电, 而第二个电子管 J_2 是截止的。这时下列关系式是正确的:

$$\left. \begin{aligned}
 E_0 &= i_2(R_a + R_{\Pi} + R_c), \\
 E_0 &= E_{a_0} + i_1 R_a + i_a R_a + i_2 R_c, \\
 E_{c_1} &= i_2 R_c - i_1 R_c, \\
 E_{a_0} &= i_1 R_{\Pi} - E_{c_1}, \\
 E_{a_1} &= i_2 R_{\Pi}, \\
 E_K &= i_a R_K, \\
 E_K &= i_2 R_c.
 \end{aligned} \right\} \quad (13.11)$$

从这些关系式不难确定我們想要知道的数值:

$$\left. \begin{aligned}
 E_{a_1} &= E_{a_0} + i_a R_a - E_{c_1} \frac{R_a}{R_c}, \\
 R_{\Pi} &= R_c \frac{E_{a_1} - E_{a_0} - E_{c_1}}{E_{c_1}}, \\
 i_1 &= \frac{E_{a_0} + E_{c_1}}{R_{\Pi}}, \\
 i_2 &= i_1 + \frac{E_{c_1}}{R_c}, \\
 R_K &= \frac{i_2 R_c}{i_a}, \\
 E_K &= i_a R_K, \\
 E_0 &= i_2(R_a + R_{\Pi} + R_c).
 \end{aligned} \right\} \quad (13.12)$$

在选择定标单元的参量时, 必須滿足下列不等式:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{i_a R_a}{E_{q_1}} &> \frac{R_c + R_a}{R_c}, \\
 \frac{\mu R_a}{R_a + R_{\Pi}} &> \frac{R_c + R_{\Pi}}{R_c}.
 \end{aligned} \right\} \quad (13.13)$$

如果不滿足这些不等式, 那么定标单元就不能工作。

在确定了定标单元的参量后, 必須根据得到的 E_a 数值驗算 E_{c_1} 选择得是否正确。如果在所选的 E_a 和 E_{c_1} 的数值情况下发现电子管截止得不完全, 或者相反, 栅偏压过低, 則必須重新計算 E_a ,

的数值。

限流电阻 R 的数值可以由下式确定:

$$R = \frac{E_0^* - E_0}{i_a + i_1 + i_2}. \quad (13.14)$$

还有一个重要元件,即旁路过渡电阻 R_n 的电容 C_p 的数值没有确定。在第一章 § 3 中曾对由两个 $R-C$ 网络所组成的电路进行了分析。分析指明,如果在这个线路输入端加上幅度为 E_0 的阶跃电压,则这个电路的输出信号可由下式求得:

$$e_1(t) = \frac{R_n C_p - R_c C_c}{(R_n + R_c)(C_n + C_c)} e^{-\frac{R_n + R_c}{R_n R_c (C_p + C_c)} t} E_0 + \frac{R_c}{R_n + R_c} E_0, \quad (13.15)$$

这里 C_c 指的是由电子管输入电容 $C_{bx} = C_{cr} + (1+K)C_{ca}$ 和安装电容所组成的总电容。由关系式(13.15)可知,在满足等式 $R_n C_p = R_c C_c$ 时,分压器不会使被传输的信号发生畸变。因此,可由关系式

$$C_p = R_c \frac{C_c}{R_n}$$

来确定 C_p 的数值。但是,应用这个关系式是困难的,因为电容 C_c 是未知的。实际上因为线路是非线性的,那么每个电子管的放大倍数 K 在过渡过程的时间内是在变化的,因此,电子管输入电容 C_{bx} 的数值同样也是在变化的[米勒(Miller)效应]。

用另一种方法同样可以求出 C_p 的数值。控制栅上的电压变化的时间常数

$$\tau = \frac{R_n R_c}{R_n + R_c} (C_p + C_c)$$

经过大约等于 5τ 的时间,过渡过程实际上已经结束。时间 $\tau' = 5\tau$ 不应大于两个触发信号之间的时间间隔。当触发脉冲在时间上是平均分布时,就有一个最高频率 f_0 :