

示波管偏转系统上升时间计算模型*

陈 威 森

(上海机械学院仪器系, 上海)

摘要 本文提出了示波管偏转系统高频性能分析新方法。通过分析电子在偏转系统内的渡越时间差模型, 导出偏转系统在单位阶跃电压函数作用下, 电子束扫描轨迹方程及上升时间的计算。

关键词: 示波管; 渡越时间差; 单位阶跃电压; 电子束扫描轨迹; 上升时间

1. 概述

示波管偏转系统上升时间计算, 可以更完整准确地表征示波管的高频性能。过去的注意力主要集中于平行式偏转板在高频正弦信号作用下, 动态偏转灵敏度下降的研究上^[1]。实际示波管为了提高灵敏度, 均采用一端张开的曲折偏转板系统(图1), 过去的方法很受局限。而且现代示波器更注重上升时间测量, 因此分析偏转系统的上升时间, 既是示波器设计的关键参数, 又是示波管偏转系统设计的重要依据。

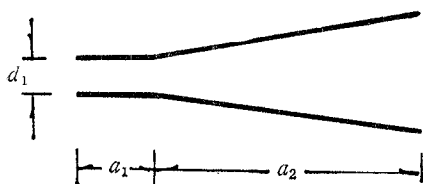


图1 曲折式偏转板及其参数

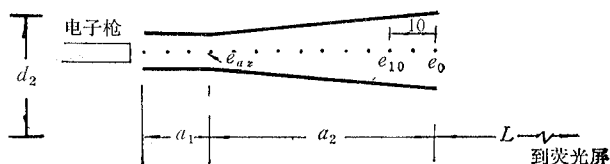


图2 偏转电压阶跃前瞬间, 电子不受偏转直飞而过的分布

本文在曲折式偏转板系统偏转灵敏度分析的基础上, 引进了“渡越时间差”模型(它由“渡越时间分散”概念引伸而来^[2]), 导出电子在屏上的扫描轨迹方程和上升时间计算。

2. 阶跃电压的偏转函数

研究高频动态偏转性能, 以暂态分析比较直观、全面。它可以全面了解高频幅值畸变和时间滞后。如果在偏转板间施加0—1V的单位函数电压 $1(t)$, 即偏转板间加零伏到1伏的零上升时间的阶跃电压。在阶跃瞬间之前, 偏转板间的电压为零, 电子不受偏转, 直飞而过, 如图2所示。当偏转板电压突然阶跃后的那一瞬时, 分布在偏转板区空间的直线排列的电子束将受到不同的偏转作用。这时, 在偏转板出口端的电子 e_0 将仍不受偏转飞到荧光屏。而离出口端10mm处的电子 e_{10} , 将只受 $a'_2 = 10\text{mm}$ 这一段倾斜偏转板的偏

* 1988年1月16日收到, 1989年3月28日修改定稿。

转,余类推。因为是阶跃电压,所以可利用静态分析方法分析。这时每处电子的偏转关系可借用已知的偏转斜率关系^[3],

$$\frac{\partial y}{\partial z} = \frac{U}{2U_a n} \ln(d'_1 + nz) + C_1 \quad (1)$$

这里偏转电压 U 现在是阶跃电压, $U = 1(\epsilon)$; C_1 是积分常数; d'_1 是到偏转板出口端距离为 $a'_2 = 10\text{mm}$ 的那一段倾斜偏转板的小口端距离; U_a 是电子枪阳极电压; $n = (d_2 - d_1)/a_2$ 是倾斜板斜度。因为是阶跃电压,初始时均未偏转,故¹⁾

$$\left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$$

得积分常数 $C_1 = -(U/2U_a n) \ln d'_1$, 代入(1)式得:

$$\frac{\partial y}{\partial z} = \frac{U}{2U_a n} \ln \frac{d'_1 + nz}{d'_1} \quad (2)$$

(2)式两边对 z 轴积分,

$$y = \frac{U}{2U_a n} \int \ln \frac{d'_1 + nz}{d'_1} dz = \frac{U(d'_1 + nz)}{2U_a n^2} \left[\ln \frac{d'_1 + nz}{d'_1} - 1 \right] + C_2$$

由初始条件 $y|_{z=0} = 0$, 得积分常数 $C_2 = U d'_1 / 2U_a n^2$, 代入得:

$$y = \frac{U}{2U_a n^2} \left[(d'_1 + nz) \left(\ln \frac{d'_1 + nz}{d'_1} - 1 \right) + d'_1 \right] \quad (3)$$

对于离出口端距离为 a_2 处的电子 e_{a_2} , 将受到 a_2 全段倾斜板的偏转。这时 e_{a_2} 在离开偏转板出口处的偏转角 θ'_2 由(2)式决定。

$$\tan \theta'_2 = \left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{z=a_2} = \frac{U}{2U_a n} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (4)$$

电子 e_{a_2} 在出口处 y 方向已偏转的距离 y'_2 由(3)式

$$y'_2|_{z=a_2} = \frac{U}{2U_a n^2} \left[d_2 \ln \frac{d_2}{d_1} - (d_2 - d_1) \right] \quad (5)$$

因此,到荧光屏时, y 方向偏转距离 D' 为

$$D' = y'_2 + L \tan \theta'_2 \quad (6)$$

故 a_2 处的电子 e_{a_2} 相应的偏转灵敏度 S' 为

$$S' = \frac{D'}{U} = \frac{1}{2U_a n} \left[\left(\frac{d_2}{n} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_1} - a_2 \right] \quad (7)$$

这里 L 是偏转板出口处到荧光屏的距离。再分析曲折式偏转板的静态偏转灵敏度为^[3]

$$S = \frac{1}{2U_a n} \left[\left(\frac{d_2}{n} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_1} - a_2 \right] + \frac{a_1}{2U_a d_1} \left(\frac{a_1}{2} + a_2 + L \right) \quad (8)$$

比较(7)式和(8)式可以看出,(8)式中的第一项是(7)式,它是纯倾斜板的偏转灵敏度。而(8)式中的第二项是

$$\frac{a_1 U}{2U_a d_1} \left(\frac{a_1}{2} + a_2 + L \right) = y_1 + (a_2 + L) \tan \theta_1$$

1) 现在 $z=0$ 是在 e_{10} 处。

其中

$$y_1 = \frac{1}{4} \frac{a_1'}{U_a d_1} U = y|_{z=a_1}$$

$$\tan \theta_1 = \frac{1}{2} \frac{a_1}{U_a d_1} U = \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_{z=a_1}$$

正是长度为 a_1 的一段纯平行偏转板的偏转灵敏度^[3]。(7)式和(8)式的这种关联,揭示了这样一个概念:在偏转板电压突然阶跃的瞬间,分布在偏转板区空间的直线排列的电子束将有不同的偏转灵敏度,在偏转板倾斜部分空间的电子,由倾斜场公式(7)式决定;在平行板区的电子,平行场和倾斜场先后都对它作用,它们的偏转灵敏度是平行板灵敏度与倾斜板灵敏度之和,由(8)式决定。

3. 阶跃上升时间计算模型

上述概念的数学表达式:倾斜板空间飞出的电子偏转灵敏度 S (倾斜)为

$$S(\text{倾斜}) = \frac{1}{2U_a n} \left[\left(\frac{d_2}{n} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_1'} - a_2' \right] \quad \left(\begin{matrix} 0 \leq a_1' \leq a_2 \\ d_1 \leq d_1' \leq d_2 \end{matrix} \right) \quad (9)$$

平行板空间飞出的电子偏转灵敏度 S (平行)为

$$S(\text{平行}) = \frac{1}{2U_a n} \left[\left(\frac{d_2}{n} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_1} - a_2 \right] + \frac{a_1}{2U_a d_1} \left(\frac{a_1'}{2} + a_2 + L \right) \quad (0 \leq a_1' \leq a_1) \quad (10)$$

这里 a_2', d_1' 及 a_1' 为变量, a_2, d_1 和 a_1 取不同的值,表示从不同 z 处飞出的电子有不同的偏转灵敏度。其中变量 d_1' 由倾斜度关系有:

$$(d_2 - d_1')/a_1' = (d_2 - d_1)/a_2 = n, \text{ 即 } d_1' = d_2 - na_1' \quad (11)$$

变量 a_1', a_2' 代表电压阶跃瞬间,分布在偏转板空间内电子的 z 轴坐标,与电子的飞越时间相关。因为从倾斜板处飞出的电子到达荧屏的时间为

$$t = T_0 + \frac{a_2'}{v_z}$$

这里 $T_0 = L\sqrt{\frac{2q}{m}U_a}$ (q/m 是荷质比), 是偏转板出口处到荧屏的时间, $v_z = \sqrt{\frac{2q}{m}U_a}$ 是电子轴向速度,所以 a_2' 为:

$$a_2' = (t - T_0)v_z = (t - T_0)\sqrt{\frac{2q}{m}U_a} \quad (12)$$

从平行板飞出的电子到荧屏的时间为

$$t = T_0 + \frac{a_2}{v_z} + \frac{a_1'}{v_z}$$

所以 a_1' 为:

$$a_1' = (t - T_0)v_z - a_2 = (t - T_0)\sqrt{\frac{2q}{m}U_a} - a_2 \quad (13)$$

即 a_1', a_2' 均和渡越时间差相关。综合(9)、(10)、(12)和(13)式可导出偏转板间施加单位阶跃电压 $1(t)$ 时,偏转通过电子束在荧屏上的慢阶跃轨迹方程。其单位电压的偏转,即偏转灵敏度 $S_T(t - T_0)$ 是渡越时间差 $(t - T_0)$ 的函数,对应(9)和(10)式的定义域,它是连续分段函数。

$$S_T(t - T_0) = \begin{cases} \frac{k}{2U_a n} \left[\left(\frac{d_2}{n} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_2 - n(t - T_0)} \sqrt{\frac{2q}{m} U_a} (t - T_0) \sqrt{\frac{2q}{m} U_a} \right] \\ \quad \left(T_0 \leq t \leq T_0 + \frac{a_2}{\sqrt{\frac{2q}{m} U_a}} \right) \\ \frac{k}{2U_a n} \left[\left(\frac{d_2}{n} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_1} - a_2 \right] + \frac{k}{2U_a d_1} \left[(t - T_0) \sqrt{\frac{2q}{m} U_a} - a_2 \right] \\ \quad \cdot \left[\frac{(t - T_0) \sqrt{\frac{2q}{m} U_a} - a_2}{2} + a_2 + L \right] \\ \quad \left(T_0 + \frac{a_2}{\sqrt{\frac{2q}{m} U_a}} \leq t \leq T_0 + \frac{a_2 + a_1}{\sqrt{\frac{2q}{m} U_a}} \right) \\ \frac{k}{2U_a n} \left[\left(\frac{d_2}{n} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_1} - a_2 \right] + \frac{k a_1}{2U_a d_1} \left(\frac{a_1}{2} + a_2 + L \right) \\ \quad \left(T_0 + \frac{a_2 + a_1}{\sqrt{\frac{2q}{m} U_a}} \leq t < \infty \right) \end{cases} \quad (14)$$

对于现代高灵敏度示波管,有一个将后加速电场和偏转系统屏蔽隔离的金属网,这是一种发散透镜,能使偏转增大,增大因子为 k 。如国产高灵敏度示波管 13SJ50J 即具有增大因子 $k = 1.77$, 其余参数 $d_1 = 1.75\text{mm}$; $d_2 = 12\text{mm}$; $a_1 = 10\text{mm}$; $a_2 = 50\text{mm}$; $L = 318\text{mm}$ 。据此,可以用(14)式计算该示波管的电子阶跃轨迹,如图 3 所示。模型函数 $S_T(t)$

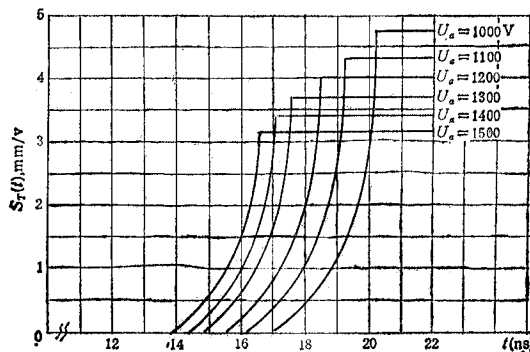


图 3 计算的示波管阶跃扫描轨迹

及其相应曲线形象地表示了示波管荧光屏上电子扫描轨迹波形。这里,造成响应延迟,上升变慢的原因是渡越时间差。波形上升时间 t_r , 定义为阶跃波从最终稳定值的 10% 上升到 90% 所需时间。利用 (14) 式计算示波管 13SJ50J 在不同的 U_a 时上升时间 t_r 。如表 1。

计算示波管偏转板阶跃上升时间对设计高频宽带示波器十分重要,它决定了示波器的高频上限。如果从示波器放大器输出的是指数上升的阶跃电压,具有上升时间 t_{rA} , 加

表 1

$U_a(\text{V})$	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$t_r(\text{ns})$	2.2	2.05	1.97	1.90	1.82	1.76

到偏转板,它在屏上显示的波形的上升时间 t_{rd} 和示波管偏转板阶跃上升时间 t_r 关系为^[1]

$$t_{rd} = \sqrt{t_r^2 + t_{rA}^2} \quad (15)$$

如果需要荧光屏上显示波形的上升时间 $t_{rd} \leq 3.5\text{ns}$ (相当于示波器频带宽 $\Delta f = 100\text{MHz}$), 则要求相应的垂直放大器施加在偏转板上的阶跃电压上升时间 $t_{rA} = \sqrt{t_{rd}^2 - t_r^2}$ (如表 2), 相应放大器带宽为 $\Delta f = \frac{0.35}{t_{rA}}$. 这里 t_{rA} 就是对垂直放大器的上升时间要求, 而相应的频带宽要求为 Δf . 例如, 如果第二阳极电压 $U_a = 1000\text{V}$, 则示波管垂直偏转板上升时间 $t_r = 2.2\text{ns}$, 要求配上升时间为 $t_{rA} = 2.72\text{ns}$ 的放大器, 即频带宽 $\Delta f = 127\text{MHz}$ 的放大器. 就可满足示波器显示的上升时间 $t_{rd} \leq 3.5\text{ns}$, 即频带宽 $\Delta f = 100\text{MHz}$ ($\approx 0.35/t_{rd}$). 示波器的垂直放大器即可据此设计.

表 2

$U_a(\text{V})$	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$t_r(\text{ns})$	2.2	2.05	1.97	1.90	1.82	1.76
$t_{rA}(\text{ns})$	2.72	2.84	2.89	2.94	2.99	3.03
$\Delta f(\text{MHz})$	127	123	121	119	117	116

4. 结束语

理论分析及计算结果, 完全被直接测试和示波器设计实践所证实. 对国产高灵敏度示波管 13SJ50J 的垂直偏转板系统用快速水银开关的阶跃方波 ($t_{rm} < 0.1\text{ns}$) 测试, 在 $U_a = 1000\text{V}$ 时, 示波管显示的上升时间 $t_r \approx 2.1\text{ns}$, 与计算相符.

在计算与测试的基础上, 曾首先用 13SJ50J 示波管设计研制了双踪宽带 (dc-120MHz) 示波器 (型号 SBM-95) 30 台. 接着, 宽带 (dc-100MHz) 示波器 (型号 SBM-14) 改用 13SJ50J 示波管后, 大批生产, 成为当时我国高级宽带示波器唯一被大量使用的示波管.

参 考 文 献

- [1] Hans E. Hollman, *Proc. IRE*, **38**(1950), p. 32.
- [2] 陈威森, 染料激光的能量测量及自动记录, *中国激光*, **6**(1979)1, 42.
- [3] M. Я. 暮良洛夫, 电子束器件, 国防工业出版社, 1959 年, p. 83.

1) 偏转板间电容 $C_0 (< 3\text{pF})$, 可以作为放大器负载电容被适当补偿, 其影响仅使阶跃电压 t_{rA} 增加.

THE CALCULATING MODEL OF THE RISE-TIME FOR DEFLECTION SYSTEM OF OSCILLOTRONS

Chen Weisen

(Shanghai Institute of Mechanical Engineering, Shanghai)

Abstract A new method of analysing the high-frequency behaviour of the deflection system of oscillograms is described. By analysing the transit-time-different model of the deflection system of oscillograms under unit-step function voltage, either the sweep trace of the electron beam or calculating formulae of the rise time can be derived.

Key words Oscillogram; Transit-time difference; Unit-step function; Sweep trace of electron beam; Rise time