

高速偏转放大器

陈铭富

(中国科学院自动化所)

摘要

高速偏转放大器是一个宽带大功率放大器,主要用于高速图形显示器中的磁偏转系统.本放大器引入一种特殊的直馈,以有效地拉宽频带并保证放大器的稳定性能.偏转线圈采用多股并绕的非分段无骨架形式,同时采用共轭补偿,以改善图形显示质量.

偏转放大器是 GTX-A 型高速图形显示装置¹⁾的功率输出部件.在图形显示器中,本放大器带宽对图形显示质量的影响,对于某一个失真百分数,记录速度加倍,则需要有加倍的带宽以保持相同的失真百分数.

利用直馈方法拉宽频带已被广泛地采用,并有明显的效果.本文所介绍的宽带功率偏转放大器是应用直馈方法的一个典型例子.

一、基本原理分析

磁偏转放大器有电感性负载,为了使放大器能稳定地工作,剪切频率应远离偏转线圈的谐振点.为最大限度地展宽频带,保证图形质量,必须尽量利用该谐振点以前的频带.为此,引入一种特殊的直馈.原理框图见图1. $K(1 + T_2S)$ 为所引入的直馈网络.图1的等效图为图2.图中 $T_1 = L/r$.图2的传递函数为

$$\frac{U_{出}}{U_{入}} = \frac{AB + BK(1 + T_2S)}{1 + AB + T_1S} \quad (1)$$

当 $BK=1$, $T_1=T_2$ 时, $U_{出}/U_{入}=1$.由此可见,只要直馈回路②的增益为1,则无论 AB 为何值,闭环传递函数永远为1,系统与频率无关.显然,图1的最大优点是用一种特殊的直馈网络排除了偏转线圈所引进的极点对放大器带宽的限制.

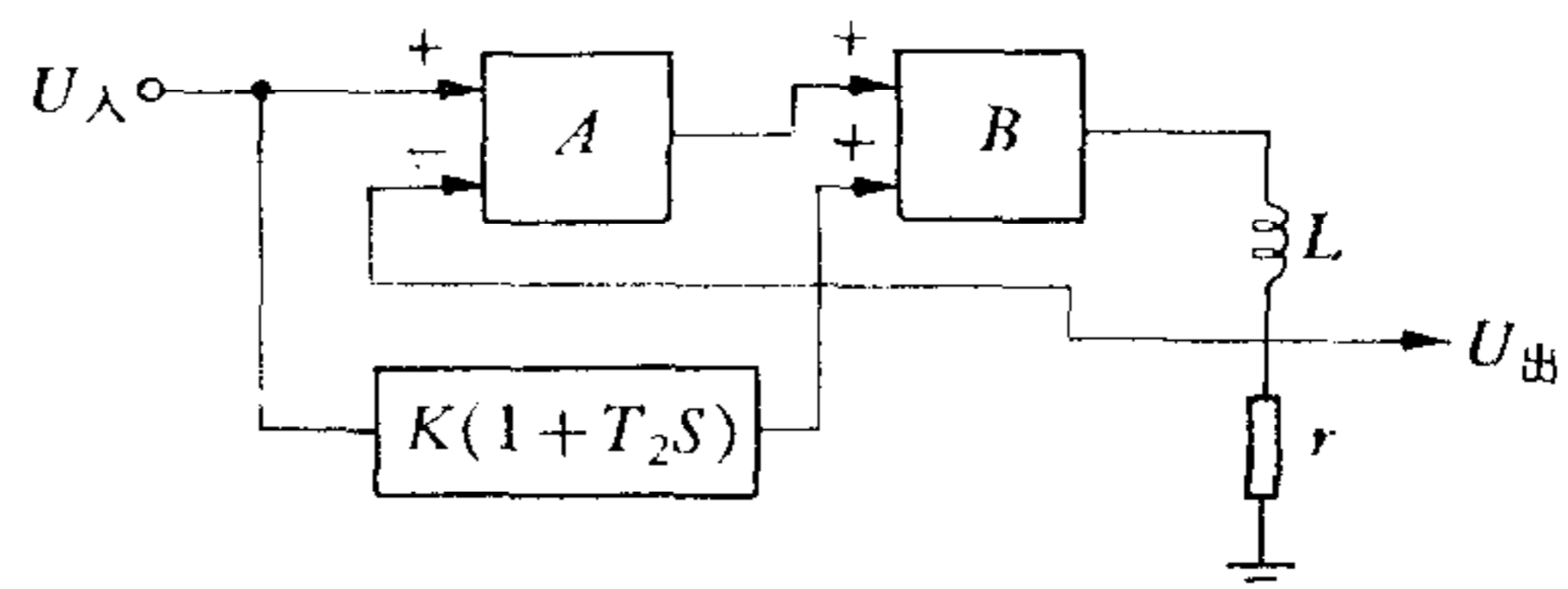


图1 放大器原理框图

图注: L 为偏转线圈; r 为电流反馈采样电阻

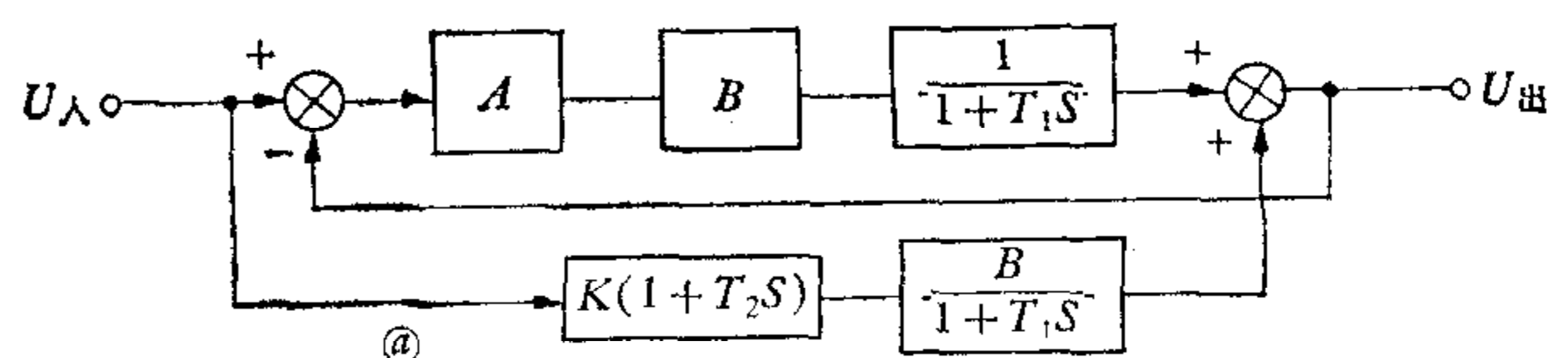


图 2

本文于 1982 年 3 月 9 日收到.

1) 见《自动化学报》8(1982),4.

直馈迴路②的增益为 1 是直馈网络微分环节引进的零点与偏转线圈引进的极点相抵消的结果.事实上,在较宽的频域内,尤其在高频段,由于各级都存在高频极点,直馈迴路的增益不能是 1. 此时,如何控制系统各参数,以保证放大器的性能是设计者所关心的问题. 为探讨上述问题,用图 3 近似地描述放大器¹⁾.

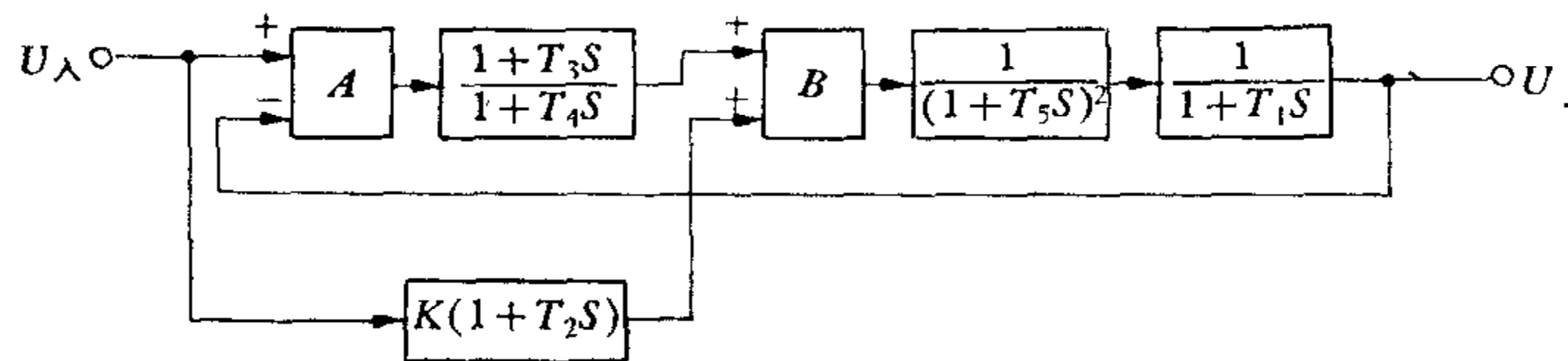


图 3 包括高频参数的图 1 的等效框图

T_3, T_4 为人工添加校正网络所形成零-极点时间常数; T_1 为 B 级放大级高频极点时间常数.

1. 稳定性分析

为分析放大器的稳定性,假定 B 放大级具有两阶高频极点,并在 A 放大级人为地加入校正网络²⁾. 仍令 $BK = 1, T_1 = T_2$, 并有 $T_1, T_3, T_4 \gg T_5$. 从图 3 可导出传递函数

$$W(S) = \frac{AB(1 + T_3S) + (1 + T_1S)(1 + T_4S)}{AB(1 + T_3S) + (1 + T_1S)(1 + T_4S)(1 + T_5S)^2} \quad (2)$$

闭环特征方程为

$$AB(1 + T_3S) + (1 + T_1S)(1 + T_4S)(1 + T_5S)^2 = 0,$$

展开并整理得

$$a_0S^4 + a_1S^3 + a_2S^2 + a_3S + a_4 = 0.$$

其中 $a_0 = T_1T_4T_5^2/AB, a_1 = 2T_1T_4T_5/AB, a_2 = T_1T_4/AB, a_3 = T_3, a_4 = 1$, Routh's 排列如下:

a_0	a_2	a_4
a_1	a_3	
b_1	b_3	
c_1		
d_1		

其中 $b_1 = (a_1a_2 - a_0a_3)/a_1, c_1 = (b_1a_3 - a_1b_3)/b_1, b_3 = d_1 = 1$. 若系统稳定工作, Routh's 排列第一列各元均必须大于零,由此得到系统稳定工作的条件是

$$AB < 2T_1T_4/T_3T_5. \quad (3)$$

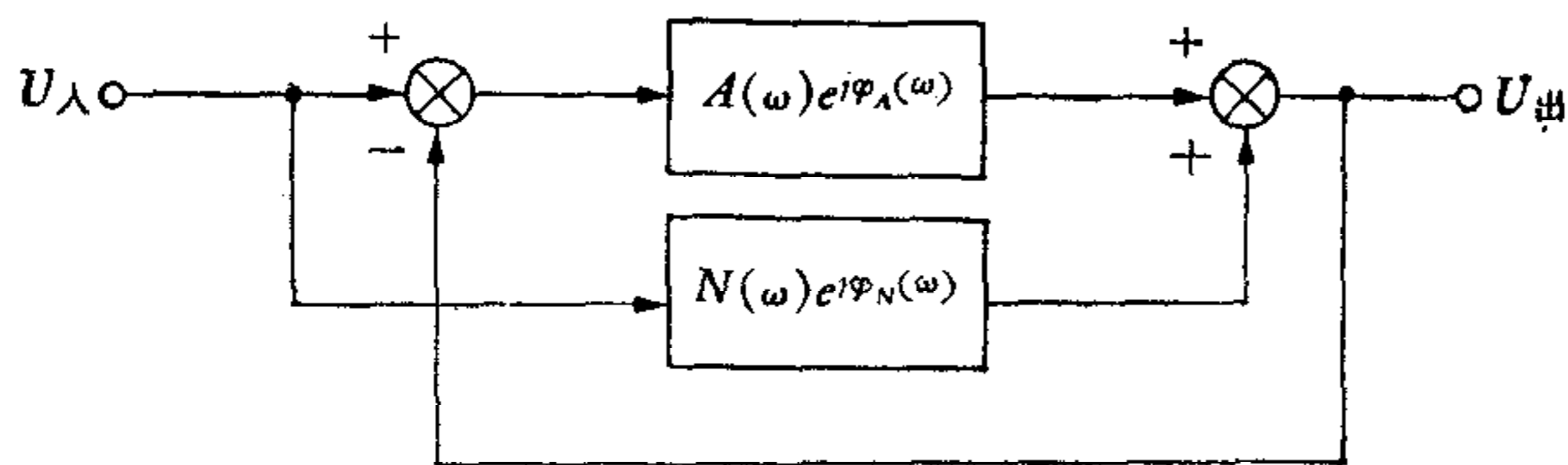


图 4

式 (3) 中,由于 $T_1 \gg T_5$ (典型值 $T_1 = 5 \times 10^{-5}$ 秒, $T_5 \approx 0.3 \times 10^{-7}$ 秒), 即使 T_3, T_4 值很接近甚至相等(即不加校正网络), (3) 式也很容易满足.

1) 图 3 假定微分环节的高频截止频率及偏转线圈的固有谐振频率大于所需的带宽,将其忽略.
2) 图 3 中 $(1 + T_3S)/(1 + T_4S)$ 环节.

2. 精度分析

为分析方便起见,用矢量方法描述图 3 所示系统,如图 4 所示. 由图 4 得

$$\frac{U_{\text{出}}(\omega)}{U_{\lambda}(\omega)} = \frac{N(\omega)e^{j\varphi_N(\omega)} + A(\omega)e^{j\varphi_A(\omega)}}{1 + A(\omega)e^{j\varphi_A(\omega)}} = \left| \frac{U_{\text{出}}(\omega)}{U_{\lambda}(\omega)} \right| e^{j\varphi(\omega)}$$

其中

$$\left| \frac{U_{\text{出}}(\omega)}{U_{\lambda}(\omega)} \right| = \sqrt{\frac{N(\omega)^2 + A(\omega)^2 + 2N(\omega)A(\omega)\cos[\varphi_N(\omega) - \varphi_A(\omega)]}{1 + A(\omega)^2 + 2A(\omega)\cos\varphi_A(\omega)}}$$

$$\varphi(\omega) = \text{tg}^{-1} \frac{N(\omega)\sin\varphi_N(\omega) + A(\omega)\sin\varphi_A(\omega)}{N(\omega)\cos\varphi_N(\omega) + A(\omega)\cos\varphi_A(\omega)} - \text{tg}^{-1} \frac{A(\omega)\sin\varphi_A(\omega)}{1 + A(\omega)\cos\varphi_A(\omega)}$$

$$\varphi_A(\omega) = \varphi_3(\omega) - [\varphi_1(\omega) + \varphi_4(\omega) + 2\varphi_5(\omega)]; \quad \varphi_3(\omega) = \text{tg}^{-1}T_3\omega;$$

$$\varphi_1(\omega) = \text{tg}^{-1}T_1\omega; \quad \varphi_4(\omega) = \text{tg}^{-1}T_4\omega; \quad \varphi_5(\omega) = \text{tg}^{-1}T_5\omega; \quad \varphi_N(\omega) = -2\varphi_5;$$

$$A(\omega) = \frac{AB\sqrt{1 + (T_3\omega)^2}}{\sqrt{[1 + (T_1\omega)^2][1 + (T_4\omega)^2][1 + (T_5\omega)^2]}}; \quad N(\omega) = \frac{1}{1 + (T_5\omega)^2}$$

从以上诸式不难看出,只要 $\varphi_N(\omega) = 0, N(\omega) = 1$, 即图 2 中④迴路增益为 1, 放大器闭环幅值 $|U_{\text{出}}(\omega)/U_{\lambda}(\omega)|$ 为 1, 相移 $\varphi(\omega) = 0$. 这时, 放大器为一理想的增益为 1 的系统. 若 $\varphi_N(\omega) \neq 0, N(\omega) \neq 1$, 则放大器必然有幅值失真和相位失真.

下表列出了④迴路在两种不同带宽(不同 T_5 值)时放大器的幅值. 从表可清楚地看出,由于④迴路的频宽限制,高频段出现上凸现象,随着直馈④迴路带宽的变窄,上凸失真现象越趋严重. 可见,为保证放大器高频段的品质,必须使④迴路有较宽的频带,其频带宽度至少应是所需放大器的带宽.

ω	0.5	1	2	3	4	5	$\times 2\pi \times 10^6$
$\left \frac{U_{\text{出}}(\omega)}{U_{\lambda}(\omega)} \right $	1.02	1.12	1.56	2.13	1.54	0.904	$\frac{1}{T_5} = 2\pi \times 5 \times 10^6$
	1.08	1.41	5.87	0.71	0.31	0.19	$\frac{1}{T_5} = 2\pi \times 2 \times 10^6$

假定 $AB = 10^3, T_3 = T_4, T_1 = L/r = 50\mu\text{S}(L = 20\mu\text{H}, r = 0.4\Omega)$

二、设计方法

1. 线路设计

为保证放大器可靠稳定地工作, AB 值应满足(3)式. 由于工艺限制,偏转线圈固有谐振频率未能远离所需频带的高端, 放大器布线产生的寄生参数和偏转线圈 X, Y 之间的共扼干扰等因素的存在, 对放大器稳定工作十分不利. 在快速图形显示器中, 由于放大器输入信号

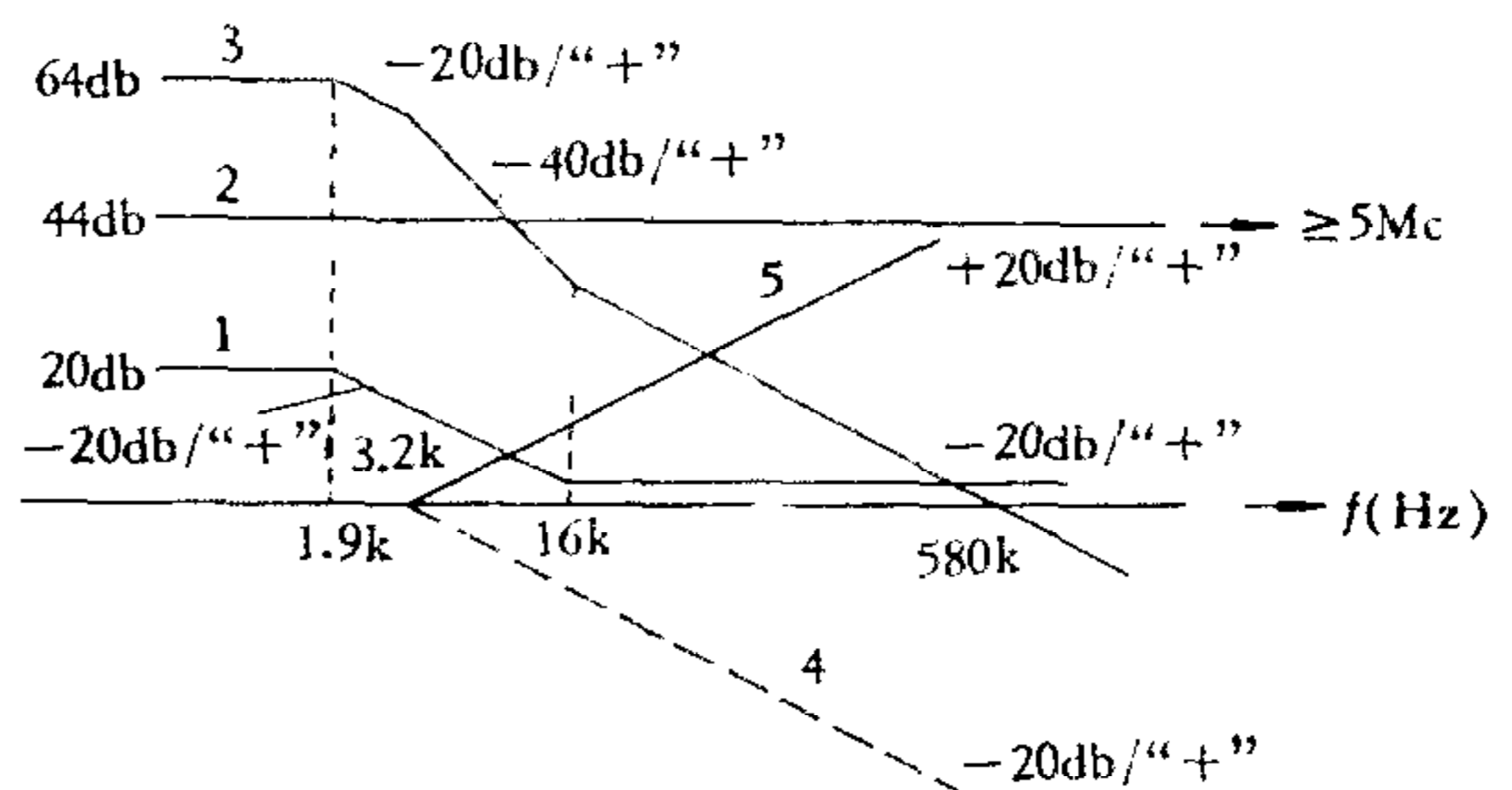


图 5 放大器各环节幅频特性

1. 放大器 A 及校正网络 $(1 + T_3S)/(1 + T_4S)$ 合成特性;
2. B 放大级幅频特性;
3. 去直馈网络 $K(1 + T_2S)$ 后的放大器开环合成特性;
4. 偏转线圈幅频特性;
5. 直馈网络 $K(1 + T_2S)$ 及 B 放大级合成特性.

比较复杂,脉冲冲击十分严重,这就要求放大器有极高的稳定储量.所以,在实际设计时对 AB 值应施加严格的限制.

直馈@回路各级应具有所要求的放大器的带宽,本放大器的带宽选取 $\geq 5MC$. 参见图 5.

2. 共轭补偿

偏转线圈引入的低频极点已与直馈网络 $K(1 + T_2S)$ 引入的零点相抵消.但由于线圈的不对称性、 X, Y 线圈组合不完全正交,使线圈之间存在的耦合不能完全抵消.因此,当 X 放大器有信号输入时, Y 放大器也有微小的信号输出,形成对 Y 放大器本身输出信号的干扰. Y 放大器的输入也对 X 放大器的输出产生干扰,使图形显示质量下降.

为消除这一干扰,提高图形显示质量,采用图 6 所示共轭补偿办法.其原理是利用微分-放大-比例环节将 X, Y 放大器的输入信号变换成与 Y, X 输出端的干扰信号幅度相同、相位相反的信号馈送到 Y, X 放大器的输入端以抵消在 Y, X 放大器输出端所出现的干扰信号.

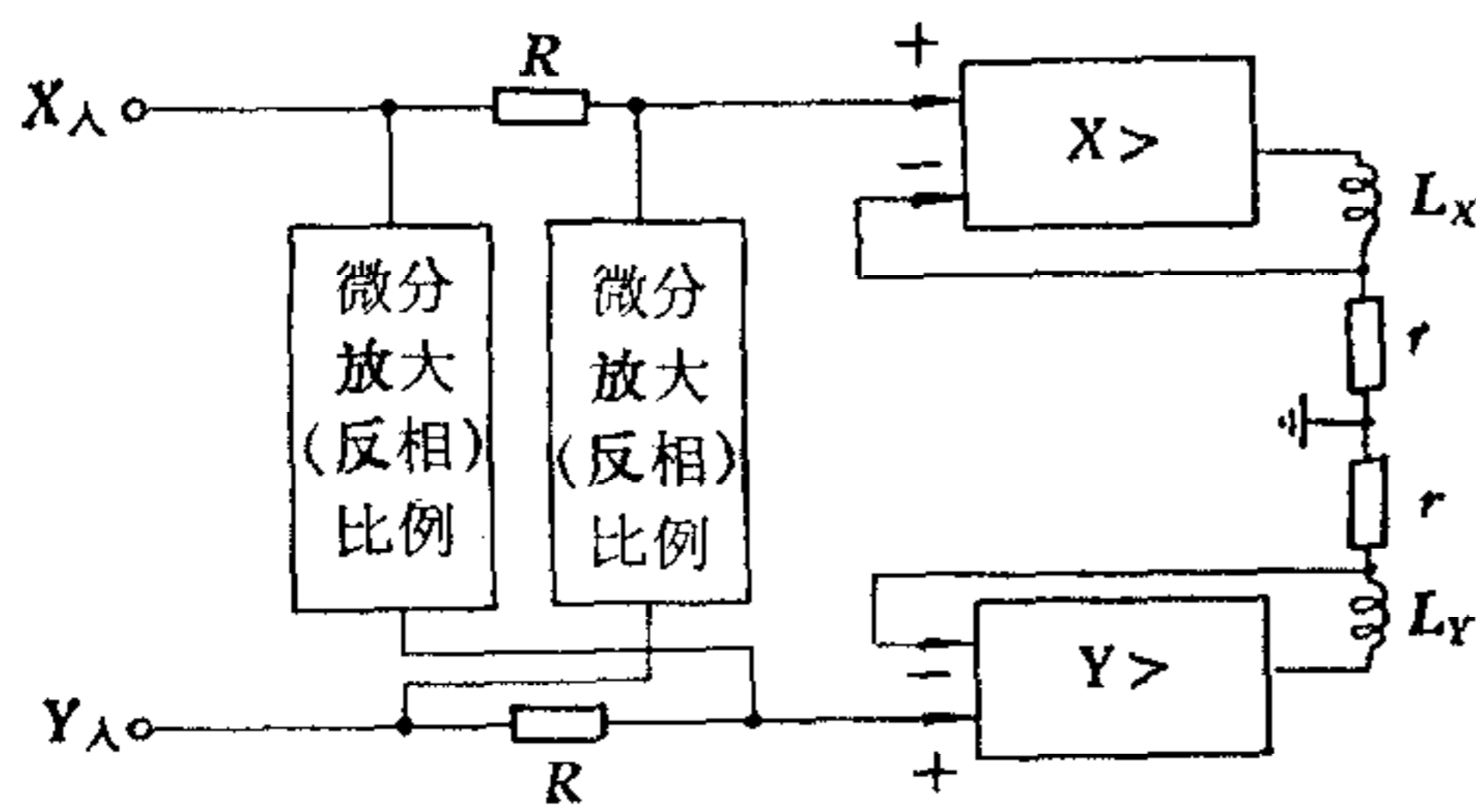


图 6 共轭补偿原理框图

图中 L_x, L_y 分别为 X 偏转线圈和 Y 偏转线圈; r 为电流反馈电阻.

三、结 果

高速偏转放大器电原理图见图 7. 图中三极管 T_1, T_2, T_3, T_{20} 组成 A 放大级. 电阻 R_6 、电容 C_2 组成校正网络¹⁾. 三极管 T_4-T_{15} 组成 B 放大级. 电阻 R_{48}, R_{50} 、电容 C_{29} 、三极管 T_{18}, T_{19} 组成 $K(1 + T_2S)$ 网络. 用可变电阻 R_{54} 改变 K 值,以实现 $BK = 1$. L_0 为偏转线圈电感. 电阻 R_{37}, R_{39}, R_{40} 、电容器 C_{24}, C_{26} 、三极管 T_{16}, T_{17} 组成线圈补偿网络. 电感 L_4, L_5, L_6 起抑制高频自激作用²⁾. 二极管 D_{15}, D_{16} 组成 $K(1 + T_2S)$ 环节的非线性负反馈电路. 电阻 R_2 、电容 C_1 、二极管 D_1 组成非线性充放电回路. 它们均能改善脉冲响应性能. 偏转线圈用多股自粘性漆包线绕制,成型后装在一个牛皮纸圆筒上.

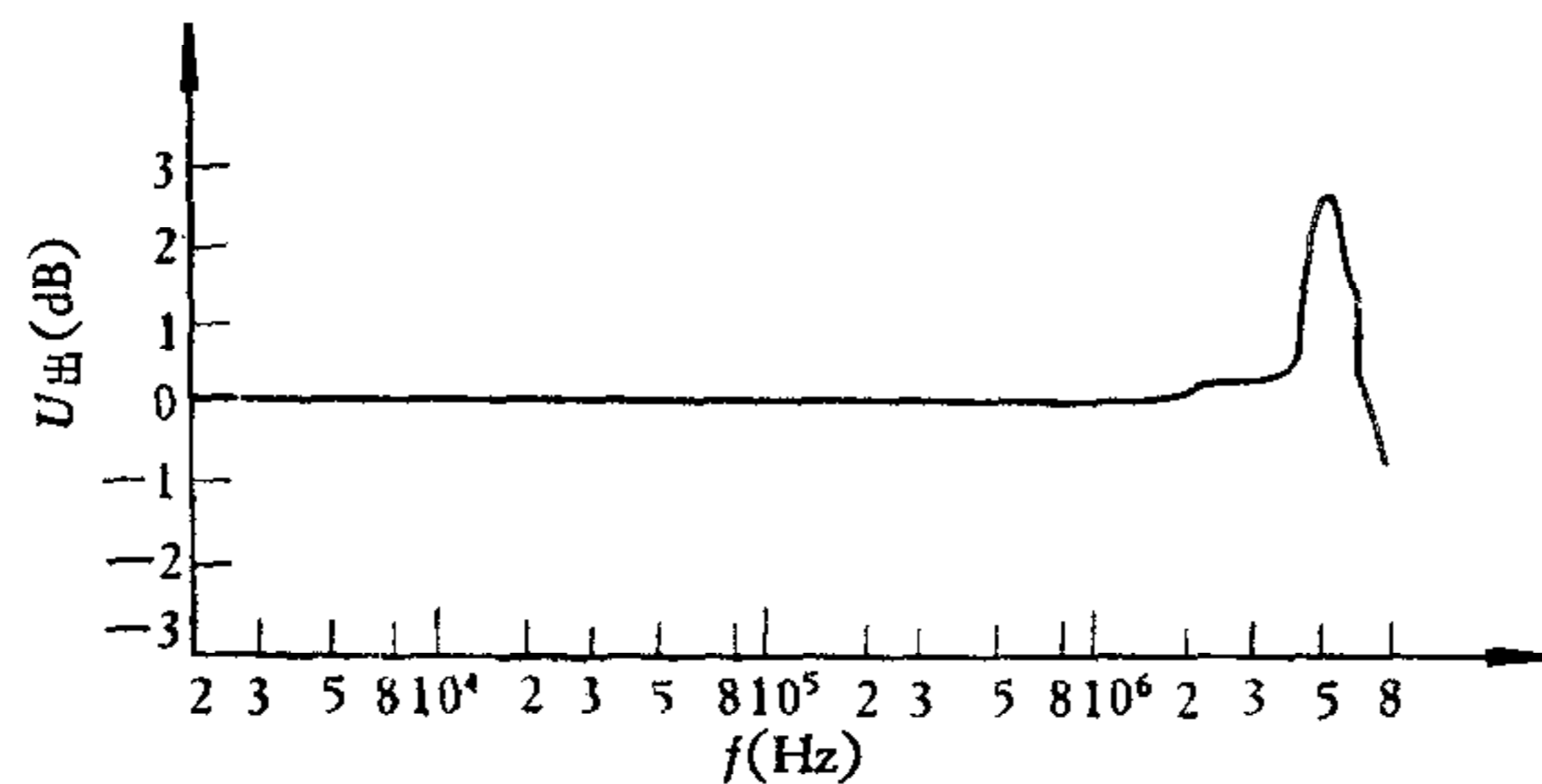


图 8

1) R_6, C_2 的计算见文献[1].
2) 视末级起振状况而定.

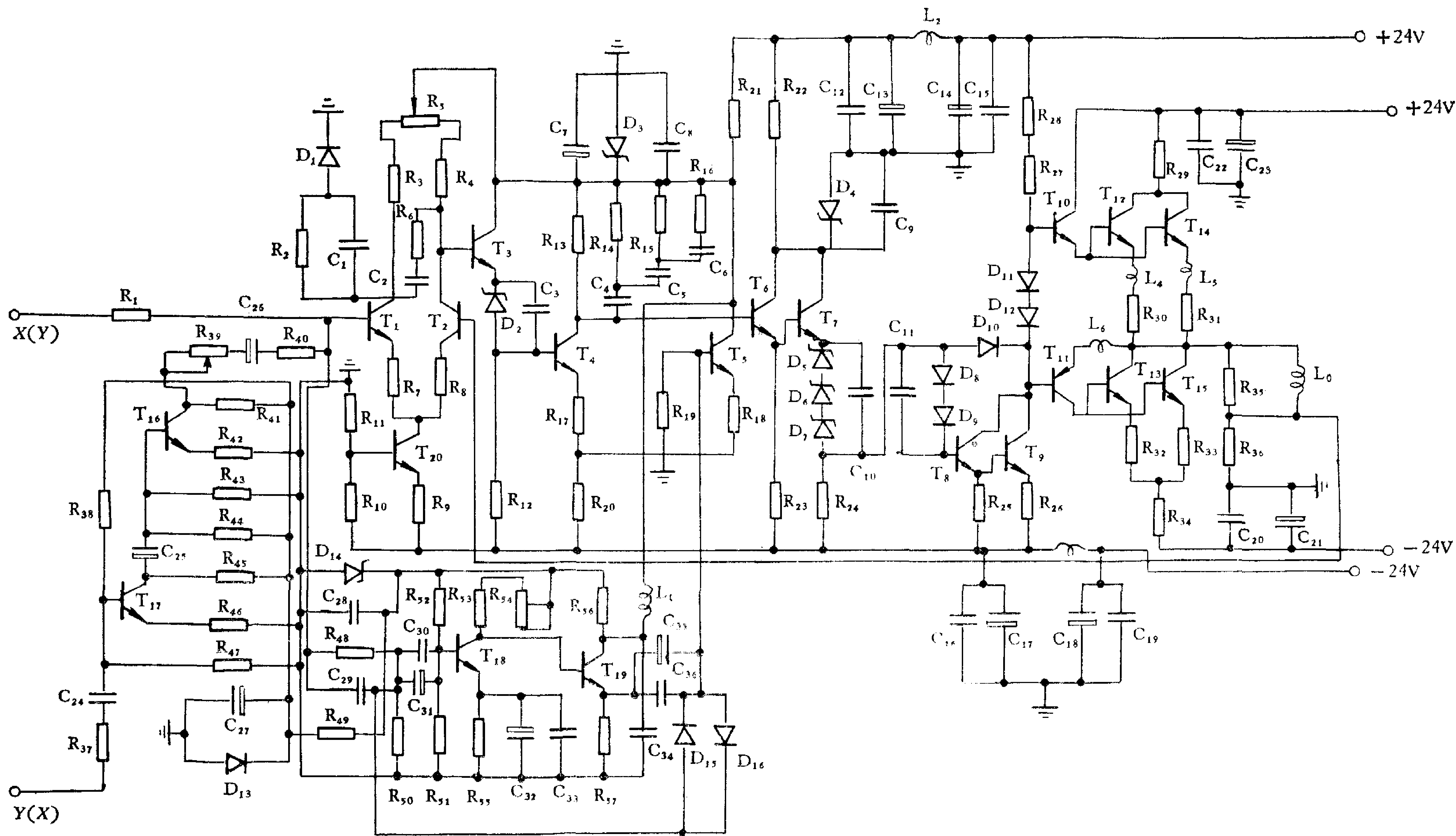


图7 高速偏转放大器电原理图

放大器的最大输出电流为 $\pm 10\text{A}$; 额定输出电流为 $\pm 7\text{A}$; 小信号带宽 $\geq 5\text{MC}$; 画线延迟 $\leq 30\text{nS}$; 阶跃响应时间 $\leq 20\mu\text{S}$ (误差在 $\pm 0.1\%$ 以内); 共轭干扰 $\leq 0.1\%$; 偏转线圈电感量 $\leq 20\mu\text{h}$ 。

图 8 为放大器闭环小信号带宽。在 1.5MC 处曲线出现较明显的上凸现象, 在 5MC 处上凸现象最严重, 与理论分析结论一致。 5MC 处上凸幅值不超过 3db , 满足 5MC 带宽要求。

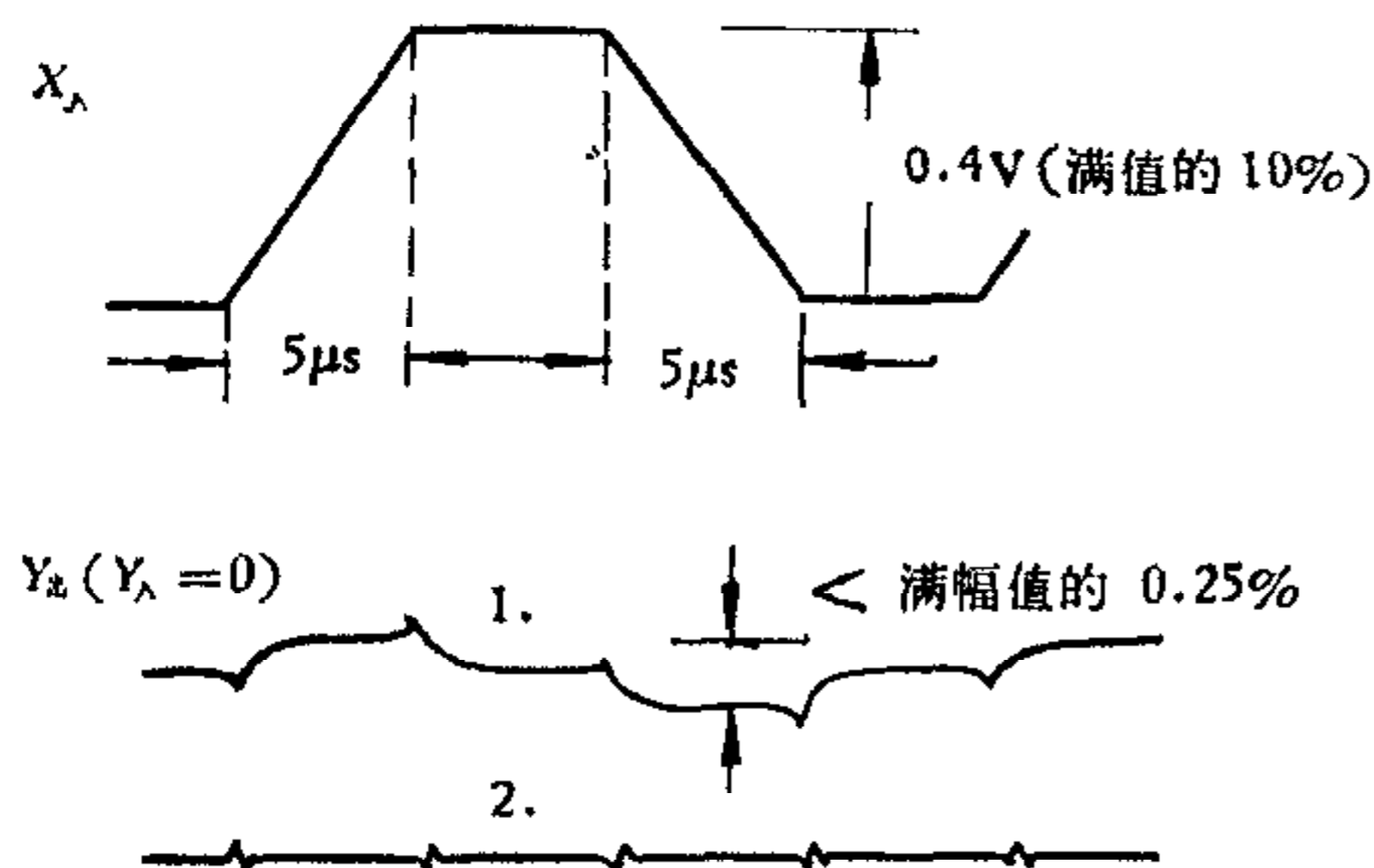


图 9 共轭干扰补偿
1. 未补偿; 2. 加补偿

画线延迟测量是在放大器的输入端输入一斜面电压波¹⁾, 用示波器比较输入及输出两信号的时间关系, 测得延迟时间 $\leq 30\text{nS}$ 。

阶跃响应精确测量是在显示屏幕上用打点办法进行^[2]。其结果作为快速图形显示装置 GTX-A 整机定位时间指标: $\leq 20\mu\text{S}$ (误差在 0.1% 以内)。

图 9 是用示波器观察到的共轭干扰信号²⁾。加补偿之前, 干扰信号的幅值不超过满幅值(GTX-A 是 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$)的 0.25% 。在此情况下, 于荧光屏对角线上画出从始点至终点及从终点到始点的两直线不相重合并有弯曲失真, 这是高质量高速图形显示装置 GTX-A 所不能允许的。

参 考 文 献

- [1] M. Bronzite, B. SC., A wideband D. C., Amplifier for an Inductive Load, *Electronic Engineering*, 38(1966).
[2] Sol Sherr, Fundamental of Display System Design, Wiley-Inter science, (1970).

A FAST DEFLECTING AMPLIFIER

CHEN MINGFU

(Institute of Automation, Academia Sinica)

ABSTRACT

A fast electromagnetic deflection amplifier is essentially a wideband power amplifier. It is mainly used for driving the power stage of the magnetic deflection system in high-speed CRT display. The good performance of high stability is obtained by introducing a special feedforward to extend bandwidth. A yoke is designed based on a shunt-wound structure with multiple wire and in a non-sectionalized form without skeleton. In addition, the conjugate compensation is used to improve the display quality.

1) 输入信号与图 9 相同。

2) 输入信号与图 9 相同。