

高等学校试用教材

核电子学

下册

王经瑾
范天民
钱永康
等编著

原子能出版社

内 容 简 介

本书是《核电子学》下册，分为六章，内容包括：幅度信息的甄别，时间信息的获取和处理，谱仪模数变换器，计数设备，多道分析器和计算机多道分析系统等。

本书着重阐述核电子学的基本理论，同时兼顾了典型电路的分析。为适应当前科学技术发展的需要，最后一章还讨论了近代计算机多道分析系统。

本书可作为高等院校实验核物理专业的试用教材或教学参考书，也可供核电子学专业学生、从事核电子学、实验核物理和核技术应用等工作的人员参考。

高等学校试用教材

核 电 子 学(下册)

清华大学 工程物理系

王经瑾 范天民 钱永康

屈建石 王志焜 谭采云 编著

兰克坚 赵希德 王晶宇

责任编辑 刘荣久

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

(重庆枇杷山后街)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ · 印张 $12\frac{3}{4}$ · 字数 303千字

1985年9月第 版 · 1985年9月第一次印刷

印数 1—2,400 统一书号: 15175·584

定价: 1.75 元

前 言

本书是《核电子学》下册。

本书由北京原子能研究所许廷宝同志、王秉湖同志，北京高能物理研究所方澄同志、戴贵亮同志和北京核仪器厂郑溥堂同志审阅，由王敬欣同志绘图，作者在此一并致谢。

限于我们的水平和经验，本书可能有不少缺点和错误，恳请同志们批评指正。

编 者

1984年1月

本书主要符号说明

1. 主要下标

D——探测器、二极管

d——场效应晶体管漏极

g——场效应晶体管栅极

i(或1)——输入

l——负载

M——最大值

n——噪声、探测器中的电子

o——输出

opt——最佳值

p——正离子或空穴

s——散粒噪声、场效应晶体管源极

T——热噪声

2. 本书主要符号

A——放大器、电压比较器、放大倍数、安(电流单位)、正比计数管气体放大倍数、面积

a^2 ——电荷灵敏前置放大器输出电压噪声中的 a 噪声功率谱密度

ADC——模数变换、模数变换器

ATC——幅度时间变换、幅度时间变换器

a_i^2/ω^2 ——前置放大器输入端并联电流噪声中的 a 噪声功率谱密度

B——贝塔函数、磁感应强度值、本底计数

b_i^2 ——前置放大器输入端并联电流噪声中的 b 噪声功率谱密度

BLR——基线恢复器

b^2/ω^2 ——电荷灵敏前置放大器输出电压噪声中的 b 噪声功率谱密度

C——电容器、电容量

C_f ——反馈电容

C_{if} ——电荷灵敏前置放大器动态输入电容

C_{zf} ——电荷灵敏前置放大器输入端冷电容

CAMAC——一种标准化的插件式仪器与数字接口系统(通常看作英文“计算机自动测量和控制”字头的缩写)

CFD——恒比甄别器

CP——时钟脉冲

CPU——中央处理单元

CR——CR微分电路或CR耦合电路

CRT——阴极射线管

- D ——甄别器、 D 触发器、探测器、二极管
 D_B ——弹道亏损
 D_z ——过零甄别器
 DAC——数模变换、数模变换器
 DL——延迟线
 DMA——直接存储器存取
 DNL——微分非线性
 E ——能量、直流电动势、电场强度值
 e ——电子、电子电荷量、交流电动势
 ENC——等效噪声电荷
 ENE——等效噪声能量
 F ——法诺因子、法(电容量单位)、滤波成形电路的信噪比劣化系数
 f ——频率、函数、定时电路的触发比
 \mathcal{F} ——富氏变换算符
 \mathcal{F}^{-1} ——富氏反变换算符
 $F(s)$ ——函数 $f(t)$ 的拉氏变换象函数
 $F(\omega)$ 、 $F(j\omega)$ ——函数 $f(t)$ 的富氏变换象函数
 FWHM——半高宽
 FWHM_E ——用能量表示的半高宽
 FWHM_T ——用时间表示的半高宽
 FWTM——十分之一高宽
 G ——门电路、千兆(10^9)、跨导放大器
 g_m ——场效应管共源极小信号低频跨导
 H ——亨(电感量单位)、道宽、磁场强度值
 $H(s)$ ——复频域传递函数
 $H(\omega)$ 、 $H(j\omega)$ ——频率响应
 $h(t)$ ——时不变线性系统的冲击响应
 I ——直流电流、电流平均值、电流稳态值、积分常数、电流脉冲信号幅度
 i ——电流信号
 INL——积分非线性
 I/O——输入/输出
 K ——常数、绝对温度单位
 k ——常数、玻尔兹曼常数
 L ——电感线圈、电感量、相对计数损失
 \mathcal{L} ——拉氏变换算符
 \mathcal{L}^{-1} ——拉氏反变换算符
 LG——线性门
 M ——兆(10^6)、光电倍增管倍增系数、过载倍数、存储器、存储器最大字数(道数)

MCA——多道分析器
 MCS——多定标器
 m_{os} ——数字偏置
 N ——计数、电子-离子对数、电子-空穴对数
 n —— 10^{-9} 、计数率(n 或 \bar{n})、每道计数
 NIM——核子仪器插件国际标准
 P ——功率、比值、极点、气体探测器充气压力、概率、概率密度函数
 p ——微微(10^{-12})、模数变换器变换系数
 PHA——脉冲幅度分析器
 Q ——电荷量、电流冲击信号的冲击强度、触发器Q输出端
 R ——电阻器、电阻值、分辨率、读、触发器清零端
 r ——动态电阻
 $R(\tau)$ ——自相关函数
 RAM——随机存取存储器
 RC ——时间常数、RC积分电路
 ROM——只读存储器
 R/W ——读/写
 s ——秒(时间单位)、复频率变量
 $S(\omega)$ ——功率谱密度函数($-\infty < \omega < \infty$)
 $s(\omega)$ ——单边功率谱密度函数($0 < \omega < \infty$)
 SCA——单道分析器
 T ——时间、周期、晶体管、温度
 TAC——时间幅度变换
 t ——时间
 t_D ——探测器电流脉冲宽度
 t_F ——信号从最大值开始至尾部衰减到定义零的复零时间
 t_M ——达峰时间、测量时间
 t_R ——上升时间(从最大值的10%到90%)
 $t_w(1\%)$ ——信号从输入开始至尾部衰减到定义零(最大值的1%)的宽度
 TD ——隧道二极管
 TDC——时间数字变换、时间数字变换器
 $u(t)$ ——单位阶跃函数(在第一章里表示电压信号)
 V ——直流电压、电压平均值、电压稳态值、伏(电压单位)、电压脉冲幅度
 v ——速度、电压信号
 V_M ——电压脉冲幅度
 V_n^2 ——噪声电压均方值
 V_{os} ——模拟偏置
 V_T ——甄别阈
 \bar{W} ——探测器的平均电离能

- Z ——阻抗、零
- Z_0 ——电缆或延迟线的特性阻抗
- ZD ——稳压管
- ϵ ——模拟信号的定义零、介电常数
- η ——信号噪声比
- θ ——探测器的能量-电荷转换系数、相位角
- μ ——微(10^{-6})、载流子迁移率
- σ ——标准偏差或均方根偏差
- τ ——时间常数、时间变量、分辨时间
- τ_0 ——前置放大器的噪声转角时间
- τ_d ——延迟时间
- ω_0 ——前置放大器的噪声转角频率
- *——复共轭、卷积分、补充内容

目 录

第九章 幅度信息的甄别.....	1
第一节 脉冲幅度甄别器.....	1
9.1.1 概述.....	1
9.1.2 幅度甄别器的工作原理.....	1
9.1.3 幅度甄别器的触发过程.....	4
9.1.4 幅度甄别器的主要特性.....	7
9.1.5 快甄别器.....	10
第二节 单道脉冲幅度分析器.....	14
9.2.1 概述.....	14
9.2.2 单道脉冲幅度分析器的工作原理和主要特性.....	14
9.2.3 定时单道脉冲幅度分析器.....	17
第十章 时间信息的获取和处理.....	19
第一节 时间检出.....	19
10.1.1 前沿触发定时.....	20
10.1.2 过零定时.....	23
10.1.3 恒比定时.....	27
10.1.4 幅度和上升时间补偿(ARC定时).....	29
10.1.5 定时电路输入信号的放大.....	35
第二节 符合测量.....	38
10.2.1 概述.....	38
10.2.2 符合电路实例.....	40
10.2.3 瞬时符合曲线.....	41
10.2.4 快-慢符合和反符合.....	43
10.2.5 延迟符合曲线.....	44
第三节 脉冲波形甄别.....	46
10.3.1 电荷比较法.....	46
10.3.2 时间比较法.....	47
第四节 时间信息变换.....	49
10.4.1 计数式时间-数码变换.....	49
10.4.2 游标尺计时器.....	50
10.4.3 时间幅度变换.....	52
第十一章 谱仪模数变换器.....	59
第一节 概述.....	59
第二节 模数变换原理.....	61
11.2.1 线性放电法模数变换原理.....	61

11.2.2	影响线性放电法模数变换器技术指标的主要因素	65
11.2.3	比较法模数变换原理	69
第三节	谱仪模数变换器的使用	74
11.3.1	道宽选择	75
11.3.2	偏置选择	77
11.3.3	溢出地址选择	79
11.3.4	死时间校正	79
11.3.5	上阈、下阈选择	80
11.3.6	输入电路选择	82
11.3.7	符合和反符合	82
11.3.8	零点和变换系数校正	82
第四节	谱仪模数变换器技术指标的测量方法	83
11.4.1	幅度响应的测量	83
11.4.2	幅度响应的零点、变换系数和积分非线性	86
*11.4.3	稳定性测量	87
11.4.4	微分非线性的测量	89
*11.4.5	计数率特性的测量	92
第三部分	数据获取和数据处理	93
第十二章	计数设备	93
第一节	定标器	93
12.1.1	定标器的工作原理	93
12.1.2	定标器的计数损失	94
第二节	计数率计	97
12.2.1	计数率计的基本原理	97
12.2.2	计数率计的基本电路	99
第十三章	多道分析器	104
第一节	概述	104
第二节	存储器	105
13.2.1	多道分析器对存储器的要求	105
13.2.2	磁芯存储器	107
13.2.3	半导体存储器	113
第三节	多道分析器的显示器	115
13.3.1	显示原理	115
13.3.2	显示方式	118
第四节	多道分析器的数据获取	119
13.4.1	单参数脉冲幅度分析	120
13.4.2	多分析器测量	121
13.4.3	多路脉冲幅度分析	121
13.4.4	双参数脉冲幅度分析	123
13.4.5	多定标器测量	124

13.4.6	飞行时间测量	127
13.4.7	多计时器测量	128
13.4.8	慢变化信号的采样分析	129
13.4.9	数据积累的加、减和触发减	131
第五节	多道分析器的数据处理和数据输出	133
第六节	稳谱器	134
13.6.1	用外加精密脉冲作为参考信号	135
13.6.2	用射线能谱中的峰作为参考信号	136
第七节	多道分析器的自动测量	136
13.7.1	测量幅度分布时的自动循环	137
13.7.2	测量时间函数时的自动循环	138
第十四章	计算机多道分析系统	140
第一节	计算机多道分析系统概述	140
14.1.1	计算机多道分析系统的基本功能	141
14.1.2	计算机多道分析器的几种典型结构	144
第二节	计算机多道分析器实例	147
14.2.1	DD-80 微计算机多道分析器的组成和功能	147
14.2.2	微计算机多道分析器的显示原理	148
14.2.3	DD-80 接口	154
第三节	单参数谱的数据处理	157
14.3.1	γ 谱数据分析的数学方法	157
14.3.2	系统的刻度	162
14.3.3	谱数据文件和分析数据文件	166
14.3.4	γ 谱的定量分析	168
14.3.5	谱分析程序设计语言与谱分析程序库	172
第四节	多参数谱数据获取的基本方法	173
14.4.1	事件记录型	174
14.4.2	联合存储型	175
14.4.3	伪随机数字变换型	176
第五节	CAMAC 系统	179
14.5.1	CAMAC 概述	179
14.5.2	CAMAC 机箱总线与CAMAC指令	181
14.5.3	CAMAC 多机箱系统	183
附录一	电缆分支节点的阻抗匹配	187
附录二	谱数据二阶多项式 5 点平滑公式	187
附录三	常用的几项NIM标准	188

第九章 幅度信息的甄别

第一节 脉冲幅度甄别器

9.1.1 概 述

脉冲幅度甄别器（简称甄别器）的功能是：当输入信号的幅度低于某一给定值时，没有输出信号；而超过这一给定值时，就输出一个一定幅度的信号（图 9-1-1）。上述给定值称为甄别器的甄别阈或阈值 V_T ，输入或输出信号可以是电压脉冲也可以是电流脉冲。输出脉冲除了幅度一定以外，波形也往往是一定的。甄别阈的定义通常是对足够宽的输入信号而言的。当输入信号过窄时，即使其幅度到达甄别阈，输出脉冲也只能上升到不大的数值，因而不能作为信息被后续记录下来。这个问题以后还要做进一步的讨论。

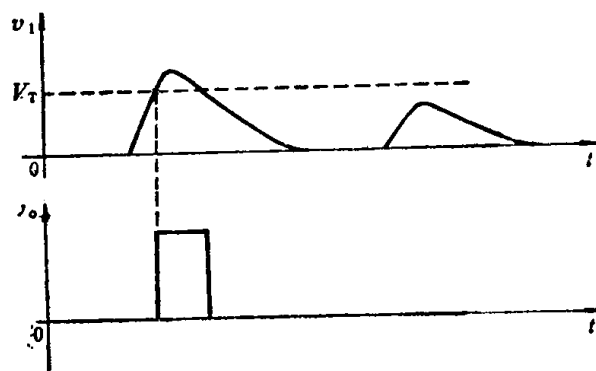


图 9-1-1 表示脉冲幅度甄别器功能的输入和输出波形

利用上述特性，甄别器可用来甄别掉幅度小于甄别阈的信号、干扰和噪声。两个不同阈值 (V_{T1} 和 V_{T2} , $V_{T2} > V_{T1}$) 的甄别器可组成本章第二节所说的单道脉冲幅度分析器，它可以从输入信号中筛选出幅度大于 V_{T1} 而小于 V_{T2} 的那些信号，从而实现了对射线能量范围的选择。

快速甄别器能判别信号的输入时间，从而得到物理事件的时间信息，广泛地用于测量核事件的时间信息和位置信息（详见第十章）。

在核电子仪器中通常用施密特 (Schmitt) 电路作为脉冲幅度甄别器，晶体管、隧道二极管、线性集成电路或数字集成电路等器件可以构成性能各异的施密特甄别器。由图 9-1-1 可知，施密特电路输出脉冲的宽度与输入信号在甄别阈附近的宽度大致相当，不像单稳态电路那样要经过一段准稳态时间才能复位，适于甄别计数率较高的序列脉冲。

9.1.2 幅度甄别器的工作原理

幅度甄别器通常由带正反馈的电压比较器组成，其工作原理在基础核电子学书籍中已有详细说明^{[1][2]}。本书从幅度甄别器的一般工作原理出发着重分析甄别核辐射信息时遇到的几个主要问题。图 9-1-2(a) 是幅度甄别器的原理电路。电压比较器 A 对输入端 1 的开环电压增益为 $-A$ ，输出端高低电平分别为 V_{OH} 和 V_{OL} ，通常为 TTL 电平（如电压比较器 BG307）或 ECL 电平（如 AM685）。输出线性范围为 $V_{OM} = V_{OH} - V_{OL}$ ，输入端 1、2 之间的线性范围 $V_{IM} = V_{OM} / A$ 。线路中正反馈系数 $F = R_2 / (R_1 + R_2)$ 。设静态时参考电压

[1] 周志成编著，核电子学基础，下册，第 65 页，原子能出版社，1980 年。

[2] 清华大学工程物理系编著，射线仪器电子学，下册，第 92 页，原子能出版社，1978 年。

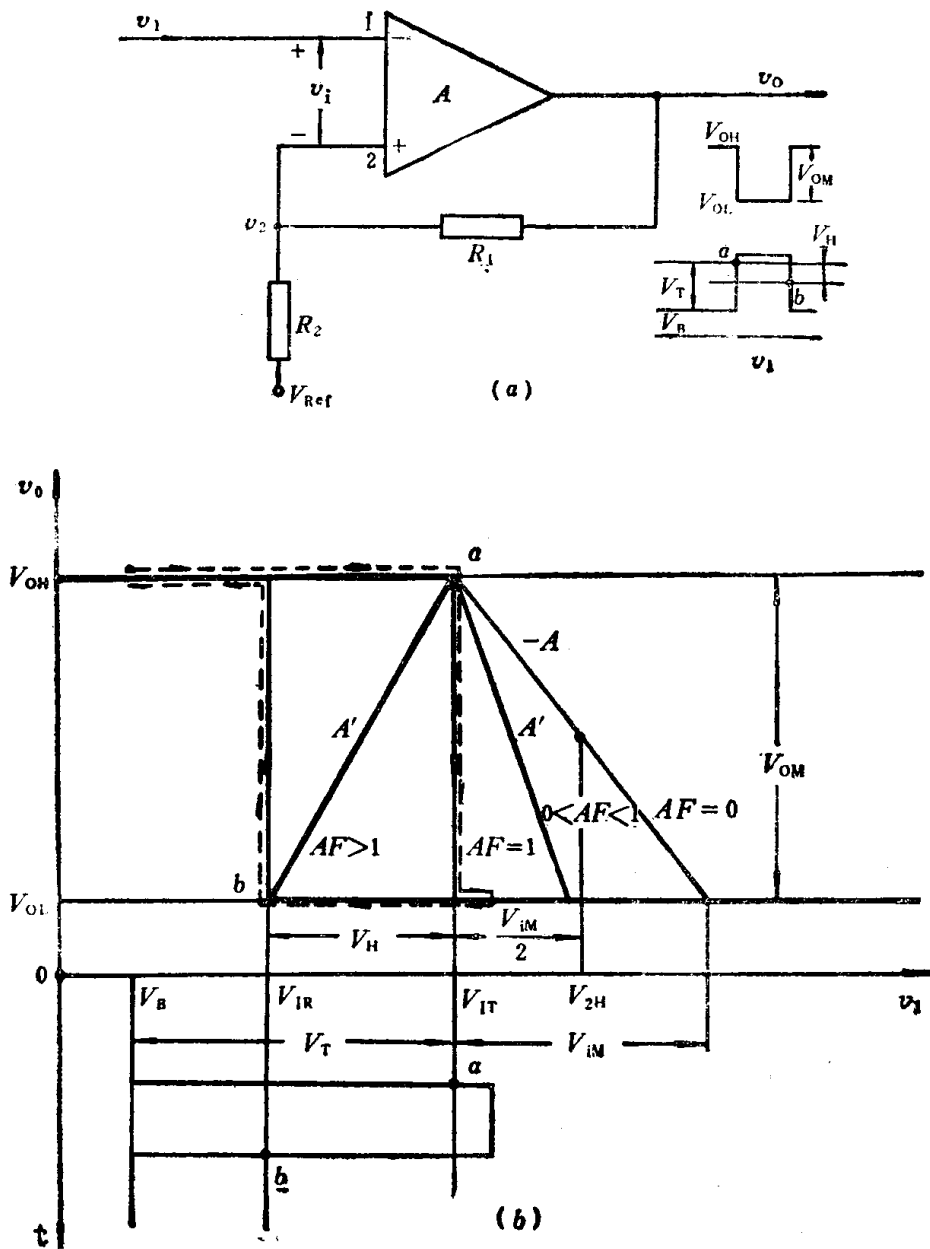


图9-1-2 幅度甄别器及其幅度特性

(a) 幅度甄别器原理图

(b) 幅度甄别器的幅度特性

V_{Ref} 处于比较高的电位，而输入信号 v_1 比它低得多。比较器处于输入端 1 被截止的状态。输出电压 $v_o = V_{OH}$ ，此时 v_2 的静态电平为

$$V_{2H} = V_{OH} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{Ref} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (9.1.1)$$

如果此电压比较器在 $v_1 = v_2$ 时正处于输入线性范围的中点，则 v_1 增大到 $V_{2H} - V_{iM}/2$ 时电压比较器进入线性区，此电位称为触发电位 V_{1T}

$$V_{1T} = V_{2H} - \frac{V_{iM}}{2} \quad (9.1.2)$$

如果线路中没有正反馈 ($F=0$)， v_1 超过 V_{1T} 后输出电位 v_o 随之下落的斜率为 $-A$ ，幅度特性如图 9-1-2(b) 中标有 $AF=0$ 的实线所示。 v_1 增加到超过输入线性范围后，

$$v_o = V_{oL}$$

在线路中存在正反馈时，工作在线性区的闭环增益 A 可由下面两个电压增量的线路方程求出：

$$\begin{cases} \Delta V_o = -A(\Delta V_1 - \Delta V_2) & (9.1.3a) \\ \Delta V_2 = F\Delta V_o & (9.1.3b) \end{cases}$$

(9.1.3a) 式表示电压比较器 A 的放大特性，(9.1.3b) 式表示线路的反馈特性。在 A 处于线性工作范围内时，上两式同时成立，闭环增益为

$$A' = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_1} = -\frac{A}{1 - AF} \quad (9.1.4)$$

在 $0 < AF < 1$ 时， $|A'| > |-A|$ ，但 $|A'|$ 为有限值。幅度特性如图 9-1-2(b) 中标有 $0 < AF < 1$ 的实线所示。如果 $AF = 1$ ， $|A'| \rightarrow \infty$ ，即 v_o 在 $v_1 = V_{1T}$ 时有跳变，如图中标有 $AF = 1$ 的实线所示。当 $AF > 1$ 时， A' 又为有限值但改变符号，幅度特性如图中粗实线所示。此特性似乎费解，但它是从 (9.1.3) 方程组得出的正确结果。其物理意义可解释如下：在 $AF = 1$ 时，只要 $v_1 = V_{1T}$ 从而进入放大器线性区，即使 $\Delta V_1 = 0$ ，输出线性范围内的任何 ΔV_o 都可满足方程组 (9.1.3)。这是因为输出端任一 ΔV_o 的存在要求输入端 1、2 之间有电压变化 $-\Delta V_o/A$ ，而输出端之 ΔV_o 反馈到输入端 2 为 $F\Delta V_o$ ，相当于使 1、2 两端间电压变化 $-F\Delta V_o$ ，在 $A = 1/F$ 时，反馈电压正好满足上述要求。所以在 $AF = 1$ 时， $v_1 = V_{1T}$ 处 v_o 可取 V_{oH} 到 V_{oL} 间任何值，幅度特性为一陡直线段。在 $F > 1/A$ 时， $A' > 0$ 。反馈电压大于维持 ΔV_o 所需的输入电压变化，如要满足 (9.1.3) 方程组，只有同时使 v_1 减小才有可能。所以 $AF > 1$ 时的幅度特性成为向左倾斜的线段，如图 9-1-2(b) 中的粗实线 ab 所示。实际上， v_1 增长到 V_{1T} 后不能随正反馈过程而自动减小，输出电压只有一直下跳到 V_{oL} 。所以， $AF > 1$ 时的实际幅度特性是：在 v_1 由小增大到 V_{1T} 时， v_o 由 V_{oH} 下跳到 V_{oL} ， v_1 再增大， v_o 恒为 V_{oL} 。如 v_1 向小变化，则要沿图中的粗实线回到 b 点，即 v_1 回到 V_{1R} 才能返回到线性区，靠正反馈使 v_o 上跳到 V_{oH} 。这一特性说明， v_1 上升时在 V_{1T} 触发甄别器，下降时却要到 V_{1R} 才能使甄别器复位。这一电压差别称为回差¹⁾

$$V_H = V_{1T} - V_{1R} \quad (9.1.5)$$

存在回差是任何正反馈深度大于 1 的触发电路的共同特性。由图 9-1-2(b) 可知

$$V_H = \frac{V_{oM}}{A'} = -\frac{V_{oM}}{A} (AF - 1) = V_{oM} \left(F - \frac{1}{A} \right) \quad (9.1.6)$$

上式的意义可由图 9-1-2 看出。在 v_1 达到 V_{1T} 后，甄别器从 1 端被截止的状态进入线性区，由于正反馈而使图 9-1-2(a) 的输出端电位下降 V_{oM} ，反馈到输入端 2 的电压变化量为 FV_{oM} 。但是 v_1 线性区的大小只有 V_{oM}/A ，在 $F > 1/A$ 时，反馈电压将使放大器进入 2 端被截止的状态。截止的深度为 $FV_{oM} - V_{oM}/A = V_H$ 。所以，要使甄别器复位， v_1 需从 V_{1T} 下降到 V_H 使增益 A 返回线性区， v_1 的下降才可引起正反馈过程，而输出电压由 V_{oL} 跳回 V_{oH} 。由此可知，产生回差的根本原因是正反馈深度大于 1。回差的具体数值则与 V_{oM} 、 A 和 F 有关。关于回差对甄别器工作特性的影响在 9.1.4 节再讨论。

甄别器用于甄别脉冲信号时，通常把刚能使甄别器触发的幅度定义为甄别阈。在甄别基线电平为 V_B 的正脉冲信号时，甄别阈为

1) 回差，又称滞后：Hysteresis

$$\begin{aligned}
 V_T &= V_{1T} - V_B = V_{2H} - \frac{V_{iM}}{2} - V_B \\
 &= V_{oH} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{Ref} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{V_{iM}}{2} - V_B
 \end{aligned} \tag{9.1.7}$$

调节 V_{Ref} 或 V_B 都可调节甄别阈。通常 $V_{iM}/2$ 很小，可以忽略。

如果输入端 1 的基线电平 V_B 高于 V_{1T} ，则甄别器用于甄别负脉冲，相应的甄别阈为

$$\begin{aligned}
 V'_T &= V_B - V_{1R} = V_B - \left(V_{2L} - \frac{V_{iM}}{2} \right) \\
 &= V_B - V_{oL} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{Ref} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{V_{iM}}{2}
 \end{aligned}$$

在图 9-1-2(b) 下方，画出了基线电平为 V_B 的矩形正脉冲触发甄别器的情况。它在 a 点达到甄别阈而使甄别器触发，在 b 点使甄别器复位。 v_o 的变化过程如幅度特性上的虚线所示。

9.1.3 幅度甄别器的触发过程

上面分析甄别器的工作原理时，都没有考虑到具体的触发过程。实际上由于分布电容的存在和放大器频带有限，触发和翻转是有一定过渡过程的。这一过程将影响窄脉冲幅度的甄别精度，还使输出信号延迟，增加时间信息的测量误差。

为了便于分析，以图 9-1-3(a) 表示甄别器。它由一级直流负载为 R 的理想跨导放大器和输出电压跟随器构成。前者的跨导为 G ，输出最大电流为 I_M ，最小电流为 0。后者的电压增益为 1。此系统的低频开环增益为

$$A = GR \tag{9.1.8}$$

输出最高电平 $V_{oH} = I_M R$ ，最低电平 $V_{oL} = 0$ ，输出幅度 $V_{oM} = I_M R$ 。分布电容或晶体管高频特性的影响可用 RC 积分电路表示，图中仅考虑一个起主要作用的 RC 积分电路。

1. 输入阶跃电压时的触发过程

如图 9-1-3(b)，设输入阶跃电压的幅度 V_1 稍大于甄别阈，超过甄别阈的部分称为超阈电压 V_{ST}

$$V_{ST} = V_1 - V_T \tag{9.1.9}$$

显然，电路仅对超阈电压有放大作用，因此 $V_{ST}u(t)$ 是放大器的等效输入电压， $u(t)$ 是单位阶跃电压。跨导放大器输入端 1、2 间的差分电压 v_i 画于图 9-1-3(c)。无斜线区为输入线性范围。我们利用在负反馈放大器中已经得到的结果来求甄别器输出波形。如果此系统是负反馈（例如将 F 改为负值），输出电压的表达式

$$v_o = -\frac{AV_{ST}}{1+AF} \left[1 - e^{-\frac{t}{RC/(1+AF)}} \right] u(t)$$

现在是正反馈，只须将上式中的 F 换为 $-F$ 。图 9-1-3(a) 的输出电压 v_o 相对于高电平 V_{oH} 的变化量为

$$\Delta V_o = -\frac{AV_{ST}}{AF-1} (e^{t/\tau'} - 1) u(t) \tag{9.1.10}$$

其中 $\tau' = RC/(AF-1)$ 。 ΔV_o 反馈到输入端 2 引起的电压变化为

$$\Delta V_2 = F \Delta V_0 = - \frac{AF}{AF-1} V_{ST} (e^{t/\tau'} - 1) u(t) \quad (9.1.11a)$$

跨导放大器两输入端的差分电压

$$v_i = V_{ST} - F \Delta V_0 = - \frac{V_{iM}}{2} \quad (9.1.11b)$$

$V_{ST}=0$ 时 $v_i = -V_{iM}/2$, 如图 9-1-3 (c) 所示。应当注意, (9.1.10) 和 (9.1.11a) 两式只有在 $v_i \leq V_{iM}/2$, 即 $V_{ST} - F \Delta V_0 \leq V_{iM}$ 时才适用; 超出此范围跨导放大器将进入非线性区。

在图 9-1-4(a) 上画出了两输入端的差分电压 v_i (图中以 v_i/V_{iM} 表示), 粗线部分表示 (9.1.11a) 式适用时的曲线 (画此图时设 $AF=3$)。图 9-1-4(b) 是 v_0 曲线, 粗线部分由 (9.1.10) 式决定。当 $v_i > V_{iM}/2$ 后, 跨导放大器 G 进入非线性区, 输出电流为零, 并联 RC 电路上的电压随后指数下降到零。图 9-1-4 上的细曲线, 就是 C 通过 R 放电的结果。用粗线表示的历程, 我们称之为触发过程或翻转过程, 细线部分则为稳定过程。 V_{ST} 越小, 翻转过程越长。在 $V_{ST} > V_{iM}$ 时,

信号一旦输入就使放大器 G 进入非线性状态, 输出电流瞬即为零, v_0 只是简单的指数衰减函数。正反馈过程实际不起作用。但是, 作为幅度甄别器, 要求信号刚超过甄别阈, 线路就靠正反馈从一个状态翻转到另一个状态。由上述分析可知, 在 V_{ST} 很小时这一翻转过程要经历很长时间。如果输入信号为宽度很窄的矩形脉冲, 在 V_{ST} 很小时, 可能 v_0 下降很少放大器 G 就被复位, 输出脉冲幅度很小。图 9-1-4(b) 中以虚线画出了在信号宽度 $t_w = 3\tau'$ 和 $V_{ST} = V_{iM}/100$ 时的 v_0 。如果后续电路的门槛电平为 V_G , 上例输出信号就不能启动后续电路, 就好象输入信号未超过甄别阈一样。由图 9-1-4 可以看出, 在输入信号宽度为 $3\tau'$ 时, 要使甄别器的输出电压幅度超过所设的 V_G , 超阈电压的最小值 $V_{ST \min}$ 大约为 $V_{iM}/8$ 。信号宽度 t_w 越小, 所需最小超阈电压 $V_{ST \min}$ 越大。 $V_{ST \min}$ 和 t_w 的关系大致画于图 9-1-5。因此, 在信号宽度有限时, 实际甄别阈都高于 (9.1.7) 式决定的数值。实际甄别阈

$$V_{TA} = V_T + V_{ST \min} \quad (9.1.12)$$

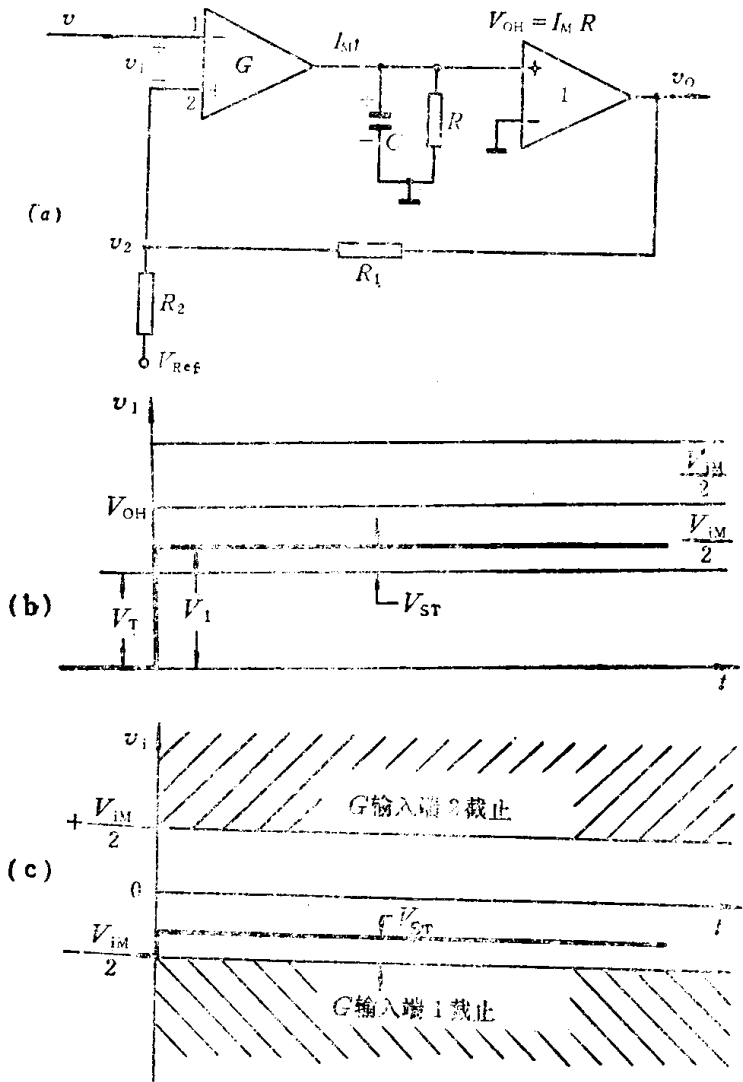


图9-1-3 计算甄别器触发过程的等效电路
(a)等效电路, (b)输入电压, (c)两输入端的差分电压

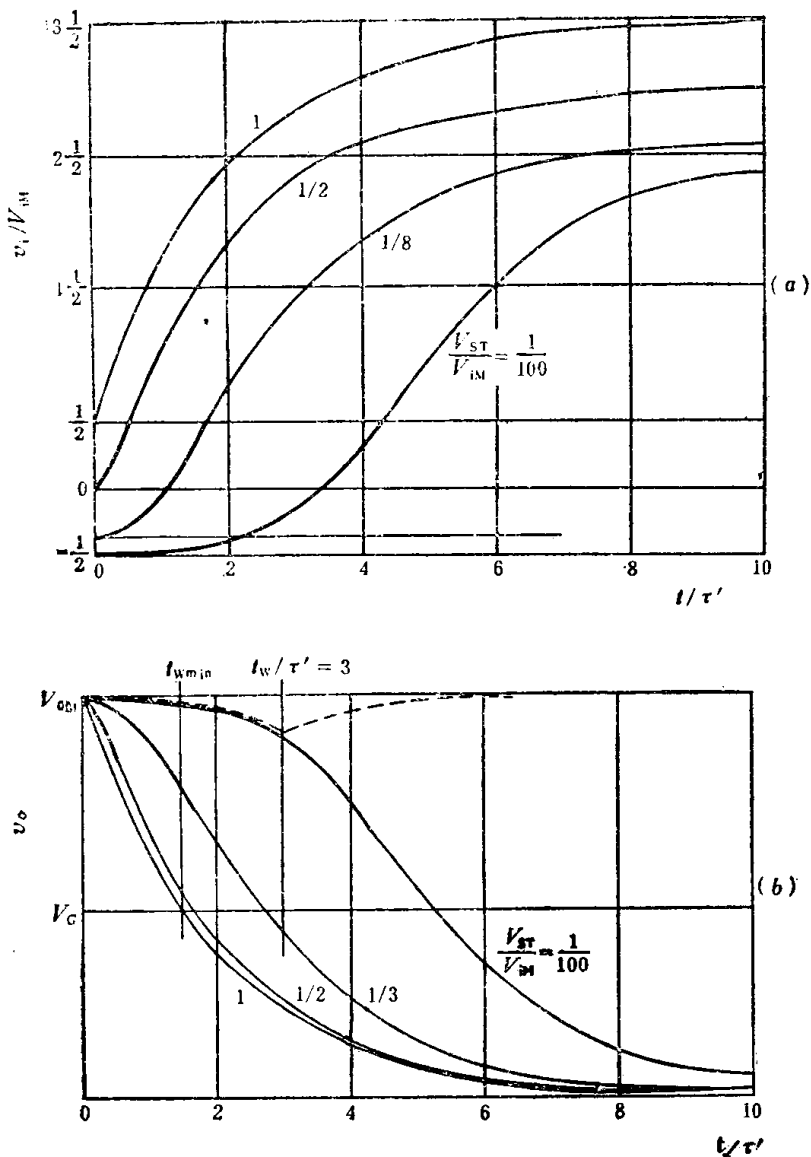


图9-1-4 甄别器的触发过程和翻转过程 (设 $AF=3$)

(a) 输入端的差分电压(v_i)波形, (b) 输出电压 (v_o) 波形

当超阈电压 $V_{ST} > V_{IM}$ 后, v_o 为图 9-1-4(b) 最左边的曲线。所以, t_w 小到一定程度后, 不管信号幅度多大, 甄别器都不能产生超过 V_G 的输出信号。这个可甄别信号的最小宽度 $t_{w \min}$ 在图 9-1-4(b) 的实例中大约为 $1.5\tau'$ 。一般甄别器的 RC 时间常数约为 10ns 级, 在 $AF=3$ 时 $\tau' \approx 5\text{ns}$ 。因此一般甄别器难以用来甄别宽度小于 10ns 的脉冲。就是对宽度稍大一些的脉冲, $V_{ST \min}$ 也可能较大, 而 $V_{ST \min}$ 又和放大器开环增益以及分布电容等参数有关, V_{TA} 不稳定。实际上, 由于放大器的增益在线性区内并非常数, 在线性区边缘增益通常较小, v_o 波形的前沿比图 9-1-4(b) 还要慢得多。所以除特殊设计的快甄别器外, 一般甄别器只适于甄别宽度为 100ns 量级以上的脉冲。

对于非矩形输入信号, 计算 $V_{ST \min}$ 比较复杂, 但可根据上述分析结果进行粗略估算。

2. 输入线性增长电压时的触发过程

当甄别器用于甄别信号前沿超过甄别阈的时刻, 可以将前沿简化为线性增长电压来分析触发过程。我们知道, 直线增长电压是阶跃电压的积分。

设超阈的阶跃电压为

$$v'_{ST} = V_{ST} u(t)$$

经图 9-1-6(b) 的积分电路

积分后为

$$\begin{aligned} v_{ST} &= \int_0^t \frac{v'_{ST}}{R_1 C_1} - at \\ &= \frac{V_{ST}}{R_1 C_1} tu(t) \end{aligned}$$

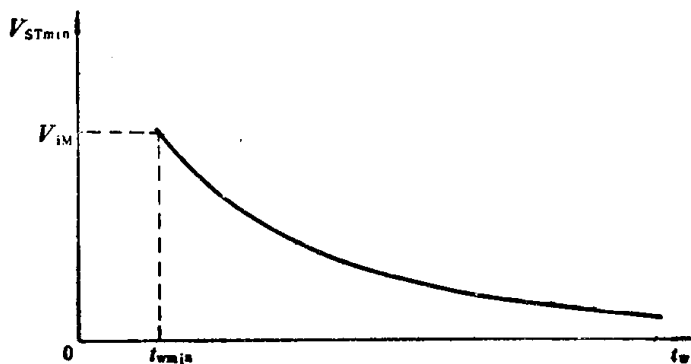


图9-1-5 不同输入信号宽度(t_w)时所需的超阈电压($V_{ST \min}$)

令 $a \equiv \frac{V_{ST}}{R_1 C_1}$ ，则 $v_{ST} = at u(t)$ 。所以，当斜率为 a 的线性增长电压触发甄别器时 [图 9-1-6(a)]，可看作超阈电压为 V_{ST} 的阶跃电压经过图 9-1-6(b)

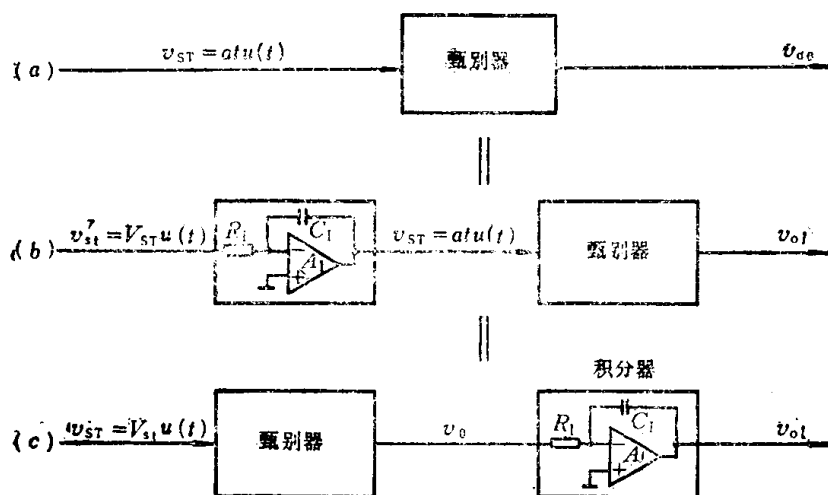


图9-1-6 线性增长电压触发甄别器的等效电路 (图中 $a \equiv \frac{V_{ST}}{R_1 C_1}$)

的积分器后再触发甄别器。第二章曾经指出，时不变线性系统内交换各串接单元的前后位置，输出波形不变。因此，在分析甄别器线性区内的触发过程时，图 9-1-6 中图 (c) 与图 (b) 等效，因而也与图 (a) 等效。这样图 9-1-6(a) 的输出电压 v_{o1} 的变化量 ΔV_{o1} 就是 (9.1.10) 式中 ΔV_o 的积分

$$\Delta V_{o1} = -\frac{a\tau' A}{AF-1} \left(e^{t/\tau'} - \frac{t}{\tau'} - 1 \right) u(t) \quad (9.1.13)$$

反馈到输入端 2 为 $F\Delta V_{o1}$

$$F\Delta V_{o1} = -a\tau' \frac{AF}{AF-1} \left(e^{t/\tau'} - \frac{t}{\tau'} - 1 \right) u(t) \quad (9.1.14)$$

v_{o1} 和两输入端差分电压 $v_{i1} = at - F\Delta V_{o1} - V_{iM}/2$ 画于图 9-1-7 (仍设 $AF=3$)。与图 9-1-4 一样，上两式仅在 $v_{i1} \leq V_{iM}/2$ 时才是适用的。 $v_{i1} > V_{iM}/2$ 后，放大器 G 进入非线性状态， v_{o1} 和 v_{i1} 的曲线形状都由电容 C 通过电阻 R 的放电规律决定。

由图 9-1-7(a) 可知，在 $a=0.005V_{iM}/\tau'$ 时 v_{i1} 起初增长甚慢，但在 $t=4\tau'$ 附近增长加快，比没有正反馈时 (如相应的虚线所示) 快得多。在 $a=2V_{iM}/\tau'$ 时， v_{i1} 增长较快，但比无正反馈时快不了多少。所以，用于甄别快速前沿信号到达时间的电压比较器，有时不加正反馈。由图 9-1-7 还可知，甄别器输出信号相对于输入信号到达甄别阈的时刻总有一定延迟。信号前沿斜率越小，延迟越大。在信号前沿陡直时，此延迟仍决定于电容 C 上电压的放电时间常数 RC 。所以，要想从甄别器输出信号精确测定输入信号到达甄别阈的时刻，既要求信号通过甄别阈时的斜率大，又要求甄别器的时间常数 RC 小， AF 大。

9.1.4 幅度甄别器的主要特性

1. 最小和最大甄别阈

由图 9-1-2(b) 可知，甄别阈 V_T 不能调到小于回差 V_H 。如果增加 V_B 使 $V_T < V_H$ ，