

射线仪器电子学

下 册

清华大学工程物理系 编著

原子能出版社

内 容 简 介

本书分上、下两册。上册主要介绍在射线仪器中常用基本电路的原理和分析方法,其中包括 RC 电路、脉冲放大器、反馈放大器、直流放大器、触发电路与振荡电路、计数率电路以及固体电路。下册以几种典型射线仪器为中心详细介绍一般通用射线仪器的工作原理、分析方法、设计原则和生产、使用中的一些实际问题。其中包括通用线性脉冲放大器,单道脉冲幅度分析器,定标器,高、低压直流电源和多道脉冲幅度分析器。

本书可供大专院校有关专业作教学参考书,也可供其他有关专业的工人、干部和科技人员参考。

射 线 仪 器 电 子 学

下 册

清华大学工程物理系

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $15 \frac{11}{16}$ ·字数 420 千字

1978年11月北京第一版·1978年11月北京第一次印刷

统一书号: 15175·121

定 价: 1.45 元

目 录

第八章 线性脉冲放大器	1
第一节 线性脉冲放大器的任务	1
一、线性脉冲放大器的基本任务	1
二、线性脉冲放大器的总体考虑	5
三、几种常用探测器输出信号的有关数据	7
第二节 线性脉冲放大器的实例	7
一、主放大器电路的总体情况	7
二、基本放大节	9
三、输出放大节	20
四、去耦滤波器	21
五、430 型放大器的主要指标	23
六、前置放大器	24
第三节 放大器的通频带、噪声和干扰	25
一、放大器的通频带	25
二、放大器的噪声和干扰	29
第四节 关于线性脉冲放大器指标的讨论	38
一、放大倍数	38
二、放大倍数的稳定性	38
三、放大器的线性	41
四、噪声和信号噪声比	48
五、放大器对高计数率输入脉冲的适应性	50
六、抗幅度过载	55
七、放大器的上升时间	55
八、放大器的输入阻抗和输出阻抗	56
第五节 线性脉冲放大器的成形电路	57
一、对成形电路的要求	57
二、常用的成形电路	58
三、常用成形电路的信号噪声比	67
第六节 4412 型线性脉冲放大器	68
一、整机方框图	68

二、反馈放大节	69
三、4412 型线性脉冲放大器的主要指标	70
第七节 核辐射探测器与脉冲放大器的连接形式(脉冲成形形式)	71
一、电压型放大	71
二、电流型放大	73
三、电压-电流型放大	77
第八节 电荷灵敏放大器	78
一、电荷灵敏放大器的基本原理	79
二、对电荷灵敏放大器的基本要求	80
三、电荷灵敏放大器噪声的定量表示方法	82
四、电荷灵敏放大器的实例	84
五、电荷灵敏放大器的噪声测量	87
第九章 单道脉冲幅度分析器	92
第一节 脉冲幅度甄别器(积分甄别器)	92
一、用途	92
二、对脉冲幅度甄别器的基本要求	94
三、几种常用的甄别器电路	97
第二节 单道脉冲幅度分析器	125
一、单道脉冲幅度分析器的原理	125
二、单道分析器电路实例	135
三、有关单道分析器的几个问题	142
第十章 定标器	162
第一节 计数系统	163
一、计数门	163
二、十进位计数器	164
三、译码与显示	170
第二节 定时系统	180
一、时钟信号发生器	181
二、定时门和成形电路	182
三、分频电路	184
第三节 控制器	187
一、控制器的工作原理	187
二、控制器部分的具体电路	189

第四节 定标器整机分析及其主要指标	191
第五节 用集成电路作的十进位计数单元	195
一、用 $J-K$ 触发器作的十进位计数单元	196
二、用中规模集成电路作的十进位计数器	200
第六节 可逆计数器	205
一、可逆计数器的基本原理	206
二、十进制可逆计数单元	209
第十一章 直流稳压电源	222
第一节 整流和滤波	222
一、半波整流滤波电路	222
二、全波整流滤波电路	225
三、桥式整流滤波电路	227
四、倍压整流滤波电路	228
五、整流滤波电路的比较	229
六、 RC 和 LC 滤波器	230
七、整流滤波电路参数的选择	232
第二节 直流低压稳压电源	234
一、稳压管稳压电路	235
二、串联型晶体管稳压电路	239
三、稳压电源实际电路举例	256
第三节 直流高压电源	259
一、变换器的工作原理	260
二、能谱测量对探测器高压电源指标的要求	274
三、高压电源的稳压问题	278
四、高压电源电路实例分析	295
第十二章 多道脉冲幅度分析器	316
第一节 概述	316
第二节 磁心存储器	320
一、磁心存储器的总框图	320
二、磁心存储二进制数码的原理	322
三、三度四线电流重合法	326
四、磁心板和磁心体	329
五、读出和写入系统、数码寄存器	334

• IV •

六、地址的选择、地址寄存器、电压-电流译码器	339
七、存储时序	344
第三节 模数变换器(ADC)	348
一、几种常用模数变换的工作原理	348
二、线性放电法模数变换器	357
第四节 主要数据收集功能	383
一、单参数幅度测量	384
二、多道分析器的分区和分区测量	386
三、双参数脉冲幅度分析	388
四、多分析器测量	391
五、多维符合测量	392
六、多路同时输入的脉冲幅度分析(多路混合分析)	393
七、多定标器测量	395
八、飞行时间测量	398
九、多计时器测量	399
十、幅度分析式采样测量	400
十一、波形分析式采样测量	402
十二、符合测量	404
十三、数据收集时的三种不同积累方式——加、减、触发减	406
第五节 谱形显示	408
一、显示的基本原理	408
二、数模变换器	411
三、分区显示	413
四、加亮	413
第六节 数据输出	417
一、数字显示	417
二、数字输出	418
三、模拟量输出	419
第七节 数据处理	420
一、求 A、B 道址间的积分谱	420
二、求 A、B 道址间的各道计数和	422
三、剥谱	424
第八节 主要技术指标和测量方法	425
一、主要技术指标	426
二、主要技术指标的测试方法	439

第八章 线性脉冲放大器

第一节 线性脉冲放大器的任务

一、线性脉冲放大器的基本任务

在原子能工业生产和科学研究中，经常遇到测量核射线能谱的任务。有些射线探测器(如屏栅电离室、正比计数器、闪烁计数器、半导体探测器等)的输出脉冲幅度在一定条件下和射线的能量成正比，这时可以通过测量探测器输出脉冲的幅度分布，以确定射线的能量或能谱。所谓脉冲的幅度分布是指幅度在 U_m 和 $U_m + \Delta U_m$ (ΔU_m 是 U_m 的增量)之间的脉冲计数率 n 和 U_m 的关系曲线： $n = f(U_m)$ 。作为例子，在图 8-1 中画出了一条脉冲幅度分布的曲线，纵座标代表计数率 n ，横座标代表脉冲幅度 U_m ，假定 ΔU_m 取为 10 mV。从曲线上可知，幅度在 $U_m = 400$ mV 和 410 mV 之间的脉冲计数率为 500 计数/分，幅度在 $U_m = 500$

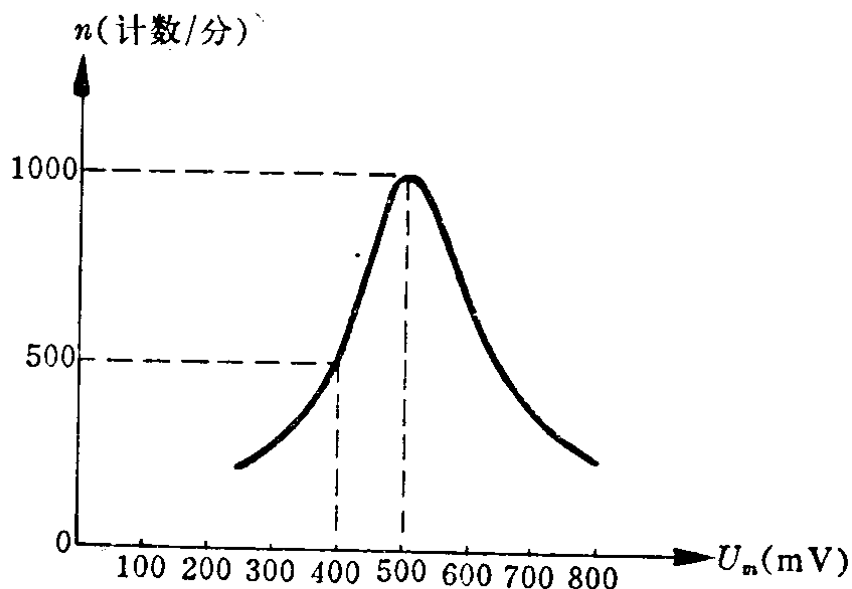


图 8-1 脉冲的幅度分布曲线

mV 和 510 mV 之间的脉冲计数率为 1000 计数/分。

测量脉冲幅度可用脉冲幅度分析器或甄别器。由于探测器输出的脉冲幅度一般显得过小，其波形也不适于直接用脉冲幅度分析器来测量，因此常常需要在探测器和脉冲幅度分析器之间加一脉冲放大器，即探测器输出的小幅度脉冲先经脉冲放大器适当地放大并改造波形之后，再输入到脉冲幅度分析器来测量幅度。

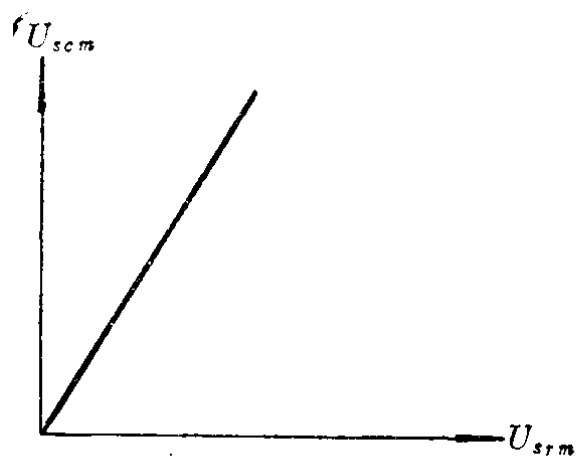


图 8-2 呈线性关系的脉冲放大器幅度特性

如果脉冲放大器的输出脉冲幅度与输入脉冲幅度保持正比关系（这时称放大器的幅度特性是线性关系），或者说，对于探测器输出的不同幅度的脉冲，放大器的放大倍数 K 是个常数，那么，经过放大之后，脉冲的幅度分布是和探测器输出脉冲的幅度分布相似的，只是脉冲幅度（横座标）一律增大了 K 倍。

这样测出来的幅度分布仍然能正确地反映射线的能谱。这如同把一张小照片的各个部分均按同一倍数放大之后并不失真一样。相反，如果放大器的放大倍数 K 不是一个固定不变的常数，而随着输入脉冲幅度的大小有所变化（这时放大器的幅度特性是非线性的，简称放大器线性不好），那么经放大之后，测量的幅度分布就要和原来的不同了。这样测定的射线能谱，也就有了误差，一般称为能谱畸变。

因此，测量射线能谱使用的脉冲放大器，最突出的一点就是其幅度特性应是线性的，这时如以 U_{sr} 和 U_{sc} 分别表示这种放大器的输入和输出脉冲的幅度，那么在直角坐标中 U_{sc} 对 U_{sr} 就是一条经过原点的直线（图 8-2），显然，这时 $U_{sc} = KU_{sr}$ ， K 是不随 U_{sr} 变化的常数。所以，这种脉冲放大器称之为线性脉冲放大器，用以强调它最突出的任务：线性地放大输入脉冲幅度。

线性脉冲放大器的第二项基本任务是对探测器输出脉冲适当

地成形。这里所指的成形不同于以前用触发器成形，如单稳态触发器是把输入脉冲改造成幅度相等、宽度一定的脉冲；这里只是指改造脉冲的波形，而改造后的输出脉冲幅度和输入脉冲幅度必须保持固定的比例关系或者不变，所以一般是利用一定的线性电路(如 RC 电路)来达到成形的目的，而不能用触发器。

为什么需要这种成形呢？这是由探测器输出信号的特点和测量要求决定的。一般探测器输出的脉冲波形如图 8-3 a 所示，其特点是：① 上升比较快，下降比较慢；② 每一个小台阶代表一个脉冲，脉冲的幅度就是台阶的高度(图中注有 U_m)；③ 除非脉冲计数率非常低，后边的脉冲往往重叠在前边脉冲的下降部分上；④ 各脉冲时间间隔不等，幅度也有大有小，即这些脉冲在时间上是统计分布的信号。

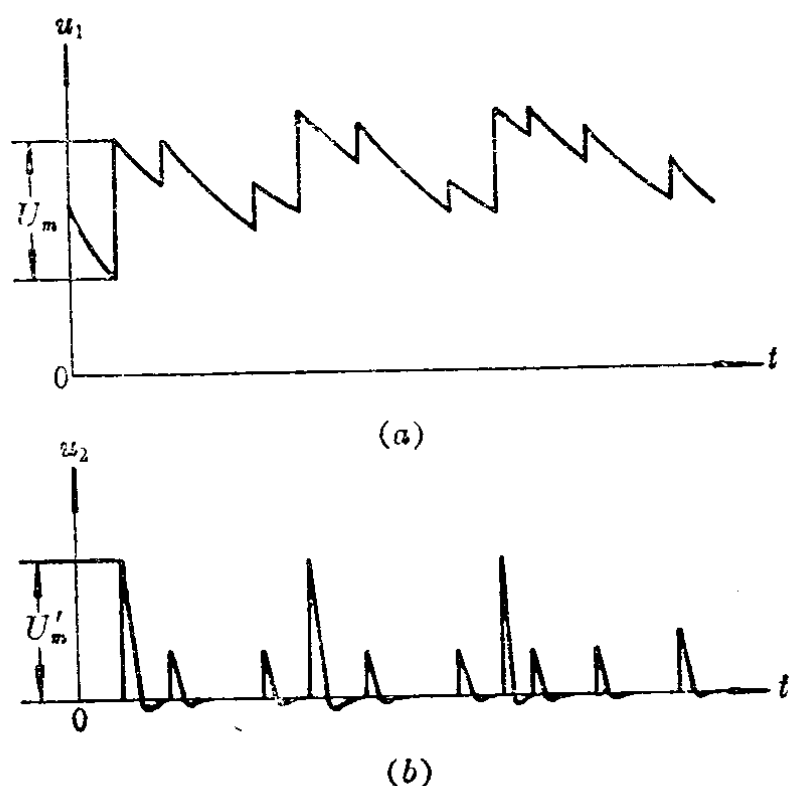


图 8-3 探测器输出信号

(a) 射线探测器输出的典型电压脉冲波形

(b) 图(a)中的脉冲经小 RC 微分电路成形后的波形

这样的脉冲，不便于进行幅度测量，而且把这种信号输入到放大器时，可能使放大器工作不正常，例如，使放大器过载，即

输入信号过大破坏了放大管的正常工作状态，可能有的管截止，而另一些管则饱和，也就不能正常放大了，所以需要成形。时间常数的 RC 微分电路是一种简单的成形电路。图 8-3 a 那样的脉冲，经过小 RC 微分电路之后，将变成图 8-3 b 的形状，即脉冲变窄，互相分离开，并从零线(指坐标横轴)开始增长，成形后的脉冲幅度 U'_m 和成形前的幅度 U_m 成比例。经过这样成形和放大的脉冲，就可送到脉冲幅度分析器中进行测量了。使用成形电路还有利于改进线性脉冲放大器的某些重要性能。成形电路的种类也很多，这些将在以后讨论。总之，线性脉冲放大器最基本的任务就是对探测器输出的信号线性地放大和成形。

作为以后讨论的线索，下边我们概略地提一下对线性脉冲放大器的要求：

① 放大器应有适当的放大倍数以保证输出脉冲幅度符合脉冲幅度分析器的要求。

② 放大倍数应不随输入信号幅度而变化，即放大器的幅度特性应当有良好的线性。

③ 放大器的稳定性应当足够高，如对温度变化的稳定性、长时间工作的稳定性和对电源电压变化的稳定性等等。放大倍数稳定性不好时，测出的幅度分布也要失真。

④ 放大器的上升时间应当符合要求(有时要求上升时间在 0.1 微秒到几微秒之间可以改变)。

⑤ 在有过载的大脉冲情况下，仍能正确地测量小幅度的脉冲，即放大器的过载性能要好。

⑥ 输入脉冲计数率很高的情况下，不产生明显的测量误差。

⑦ 输入阻抗和输出阻抗适当(根据前后电路的情况)。

⑧ 噪声和干扰应足够小(详见本章第三、四节)。关于噪声和干扰的来源、降低其影响的措施等将在以后讨论。

以上列出的几项对线性脉冲放大器的要求，只供我们初步了解一个概貌。在讨论一个线性脉冲放大器的实际电路，使我们有了了一定的具体知识之后，再分项专门研究。

二、线性脉冲放大器的总体考虑

在不同情况下使用放大器可能有很不同的要求。因此，如果测量的任务比较单纯，例如和某一定的探测器以及脉冲幅度分析器连用，并需经常测量时，可设计一个专用的放大器。如果在工作中可能碰到许多不同的测量任务，则以设计一个通用的放大器为宜。通用放大器比较复杂一些，它的某些指标应当在一定范围内可以改变，例如能改变放大器的放大倍数(几十至几十万之间)、成形电路的时间常数(零点几至几微秒)和上升时间(零点几至几微秒)等。

输出脉冲信号的射线探测器相当于一个电流源，在射线作用下输出的信号是一个电流脉冲或者说是一定的电荷 Q 。在探测器和脉冲放大器的连接上有几种可能的方式。一种最常用的方式是把这一电流脉冲(电荷)在探测器的 RC 输出电路上形成电压脉冲(探测器的输出电路通常可等效为一个电阻 R 和电容 C 并联的电路， R 包括放大器的输入电阻， C 包括放大器的输入电容)，并就近放大 1—100 倍，这部分放大器叫前置放大器或预放大器。然后用屏蔽电缆把前置放大器的输出信号送到一个基本的放大器输入端，这部分放大器叫主放大器，经过充分放大的信号再输出到脉冲幅度分析器(见图 8-4)。把整个放大器分成前置放大器和主放大器的理由如下：希望探测器输出电路上形成的电压脉冲的幅度尽可能大，以便降低对放大器的要求(如放大倍数、噪声等)，为此应增大 R 而减小 C 。减小 C 的一个有效的措施就是把放大

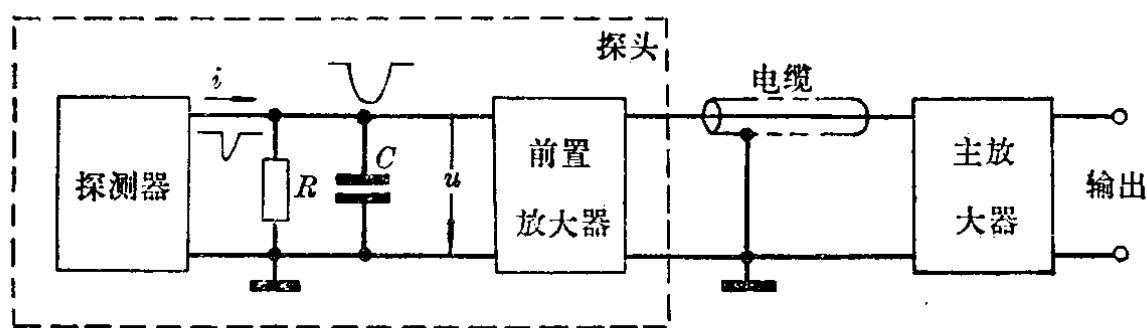


图 8-4 线性脉冲放大器的总体布局

器尽量靠近探测器以减小它们之间连接导线构成的分布电容。但在实际上探测器所在的空间可能较小，容纳不下整个放大器及操作人员，特别是在探测器附近可能由于射线较强或其他因素限制，不允许操作人员就近操作，所以就把线性放大器分为两部分——前置放大器和主放大器。前置放大器体积很小，紧靠探测器，实际上前置放大器和探测器安装成一个整体，这个整体叫探头。这样就达到了减小电容 C 的作用。主放大器和探头离开，也就不受现场条件的限制。需要控制的部分，例如改变放大倍数和成形电路参数的波段开关等也安装在主放大器上。

前置放大器和探测器放在一起并很好地屏蔽，可降低外界干扰的影响。因为信号在从前置放大器输出以前，受外界干扰的机会少(探测器和前置放大器装在一起并有良好屏蔽)，而在前置放大器输出和主放大器连接的电缆处受干扰时，探测器输出的信号已经过前置放大器的放大(假设其放大倍数大于 1)，故干扰对信号的影响减小了。从这一分析可知，如果探测器输出信号的幅度很小(如电离室输出的信号)，则前置放大器的放大倍数应当大些；反之，就可小些。例如闪烁探测器的输出信号幅度大，前置放大器往往就是一个射极输出器。各种不同的前置放大器，其放大倍数通常在 1—100 之间。

另外一种连接探测器和放大器的方式，是不采用前置放大器。此种方式是探测器输出的电流脉冲不转变成电压脉冲，而直接经电缆把电流脉冲送到电流脉冲放大器(输入电阻非常小，一般为几欧或更小)的输入端。由于晶体管放大器很容易做成电流放大器，所以近年来这种方式有所应用。这时，探头内除了探测器之外不包括任何电子元件，这在某些情况下是很有价值的。例如在探头处温度很高或有非常高的射线强度时，探头内不允许放电子元件的情况下，就可采用这种方式。由于不使用前置放大器，信号在用电缆传送过程中受外界干扰的可能性增大了，因此电缆的屏蔽要特别良好，有时要采用双层屏蔽的特殊电缆，并注意接地要良好。

三、几种常用探测器输出信号的有关数据

下表给出几种测量能谱常用的探测器输出信号的有关数据，供作参考。这些数据是粗略的估计，具体条件不同时，会有出入。探测器输出信号的情况，可作为设计放大器的依据。

表 8.1 几种测能谱用的探测器的有关数据

探 测 器	电压脉冲的最大幅度	电流脉冲的持续时间	探 测 器 的 工 作 电 压	能量分辨率	备 注
半导体探测器 金硅面垒	100mV 左右*	$<0.1\mu s$	10—200V	0.3—1%	α 粒子5—10 MeV
半导体探测器 Ge(Li)	10mV 左右*	$<0.1\mu s$	100—1000V	0.3—1%	γ 粒子0.5—5 MeV
闪烁探测器 NaI(Tl)	100mV—3V	$\approx 1\mu s$	700—1200V	6—9%	γ 粒子0.5—5 MeV, $C_{fb} \approx 10pF$
正比计数管 含 氢	500mV 左右*)	$<1\mu s$	1500—2500V	5—20%	中子1—10 MeV

* 指电荷灵敏前置放大器的输出，电荷灵敏前置放大器的反馈电容 C_f 为 1 pF，开环放大倍数大于几千。

第二节 线性脉冲放大器的实例

我们在初步了解了线性脉冲放大器的基本情况之后，先讨论一个实际电路(430 型)，以获得一些具体的知识，然后可进一步深入讨论。

一、主放大器电路的总体情况

我们先讨论放大器整机，然后再深入分析几个局部电路。

430 型放大器的电路图表示在图 8-5 中。这是一个通用的主放大器的电路。放大器的总体结构见图 8-6 的方块图。

主放大器包括：小 RC 微分电路、衰减器、三级 10 倍的放大节、倒相器和射极输出器。通常该放大器输入负脉冲，输出正

脉冲。

主放大器的输入电压脉冲先经过小 RC 电路微分（成形）。 RC 微分电路的电容就是图 8-5 中的 C_0 ，电阻就是作为衰减器的一串电阻（10 个 $100\ \Omega$ 电阻），共计 $1\text{ k}\Omega$ 。因为第一放大节的输入电阻 r_{sr} 远大于 $1\text{ k}\Omega$ ，故 r_{sr} 实际上不影响微分电路的时间常数。根据成形宽度的要求， C_0 的数值可以改变，多数通用的主放大器 RC 微分电路的时间常数一般在零点几微秒（例如 0.2 微秒）到 10 微秒范围内分若干档改变。可以用波段开关换接 C_0 。430 型放大器的 C_0 要外加。在输入脉冲计数率高以及脉冲上升时间小的情况下，可以用小一些的 RC 时间常数。

衰减器是由 10 个 $100\ \Omega$ 的电阻（ $R_{13}\cdots R_{22}$ ）串联组成，如图 8-5 所示。扳动波段开关 K_1 ，可以选择不同的分压比（ $\frac{1}{10}$ 、 $\frac{2}{10}\cdots 1$ ），这是为了适应探测器输出脉冲幅度不同时要求不同的放大倍数而设置的。因为分压电阻阻值的不稳定会直接影响整个主放大器的放大倍数（包括分压比），因此 $R_{13}\cdots R_{22}$ 这些电阻均采用高稳定的精密金属膜电阻（ $RJJ-\frac{1}{8}\text{W}$ ）。

衰减器后边接有三个负反馈放大节，各节的放大倍数均为 10 倍。前两节参数相同，第三节因为信号幅度大，故稍有变化，但基本工作原理是相同的。为了使放大倍数能有更大的变化范围，第二放大节可以接入也可以断开，这是利用开关 K_2 来改变的。这样，再配上前边的衰减器，整个主放大器的放大倍数最小可以为 10 倍，把 K_1 和 K_2 放在不同的位置时，可以使放大倍数为 20、30 $\cdots$ 100、200、300 $\cdots$ ，最大为 1000 倍。

因为 430 型线性脉冲放大器后边所配的脉冲幅度分析器要求输入正脉冲，故在第三放大节之后又加了一级倒相器（即输入脉冲和输出脉冲极性相反）。倒相器采用单管 T_{17} ，负反馈是利用大的发射极电阻（ R_{56} ， $4.3\text{ k}\Omega$ ）来获得的。在倒相器（ T_{17} ）的基极加负脉冲，从集电极输出正脉冲。倒相器的电压放大倍数略大于 1，与最后的射极输出器（电压放大倍数略小于 1）一起总的放大倍

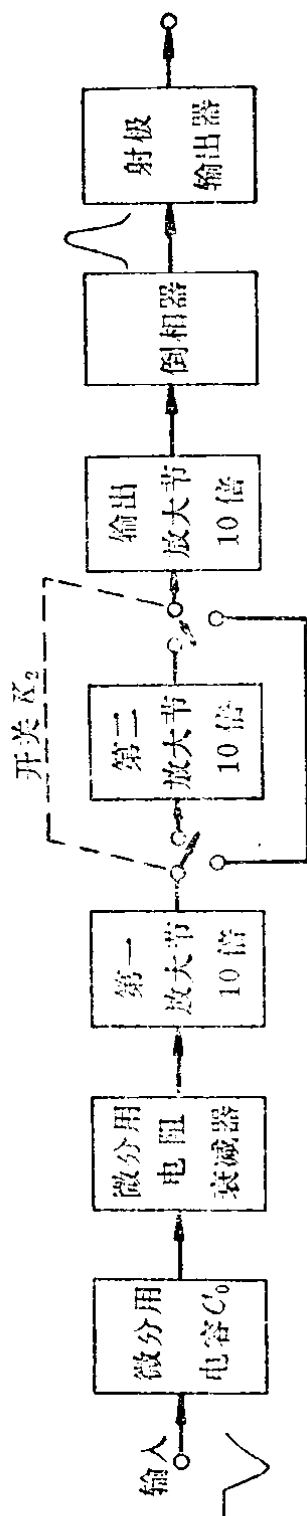


图 8-6 430 型放大器方框图

数近于 1。倒相器由于本身负反馈很强，故稳定性、线性良好。

为了减小放大器的输出阻抗，最后经射极输出器输出。

放大器的工艺和结构对于保证仪器的稳定工作和某些指标是很重要的。本放大器中第一放大节、第二放大节、倒相器和射极输出器，组装时按信号的大小依次排列，即保证放大器输入端和输出端相距最远，以避免输出大信号耦合到输入端产生不良的反馈。输入衰减器的电阻均装在波段开关上，外边用铁壳把分压电阻和波段开关整个屏蔽起来，铁壳要很好接地（接到仪器内部的地线上）。第一放大节和电源变压器外边也用接地的铁壳加以屏蔽，这些措施可较有效地减小外界干扰。放大节的印刷板均用双面镀铜的，一面主要腐蚀出电器的连线，另一面的铜皮则大部分保留，只有某些要打孔的地方腐蚀掉铜皮，这样也有利于加强屏蔽。

放大器输入部分的内部连线（除了印刷板上的），如输入插座到衰减器、由衰减器到第一放大节的输入管基极等的连线，均采用短的带屏蔽的低噪声电缆。

放大器地线的设置和连接是否良好也是很重要的。

二、基本放大节

1. 基本工作情况和放大倍数

下边我们深入分析一下基本放大节。图 8-7 中画了第二放大

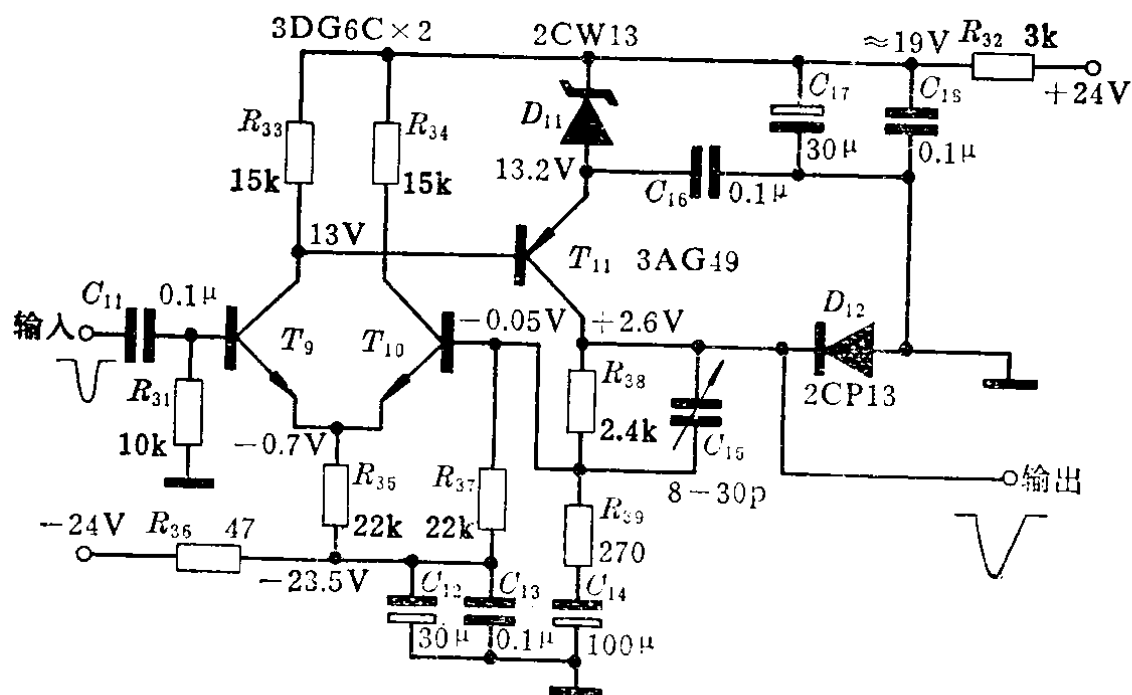


图 8-7 430 型放大器的基本放大节

节的电路，第一放大节的电路与它完全相同，只是输入端接分压器。

放大节实际上是由一差值放大级 (T_9 、 T_{10}) 和一单管放大级 (T_{11}) 组成的。差值放大级 T_9 的基极加输入信号， T_{10} 的基极加反馈信号。如果输入负信号使 T_9 的基极电位 U_{b_9} 下降，则 T_9 的集电极电位 U_{c_9} 上升，即 T_{11} 管的基极电位 $U_{b_{11}}$ 上升 ($U_{c_9} = U_{b_{11}}$)，因为 T_{11} 是 PNP 型的，故 $U_{b_{11}}$ 上升使其集电极电流减小，则其集电极电位 $U_{c_{11}}$ 也下降 (输出为负)。因此经过反馈电阻 R_{38} 和分压电阻 R_{39} 分压之后加到 T_{10} 基极的反馈信号使 $U_{b_{10}}$ 也下降。总之， U_{b_9} 下降， $U_{b_{10}}$ 也下降，根据差值放大器的工作原理知道，两个基极电位同方向变化时，输出减小，因此反馈电压将减小放大倍数，故是负反馈。

电路内部采用直耦合，因此电路内部还包括直流负反馈。

伟大领袖毛主席教导我们：“任何过程如果有多数矛盾存在的话，其中必定有一种是主要的，起着领导的、决定的作用，其他则处于次要和服从的地位。”研究放大倍数等问题时，为了突出主要矛盾，可以把图 8-7 的基本放大节电路进行简化，凡是只对静态

工作点起作用、对交流可看作短路的元件，一律将其短路。简化后的电路如图 8-8 所示（简化图中的管号改为 T_1 、 T_2 、 T_3 ）。

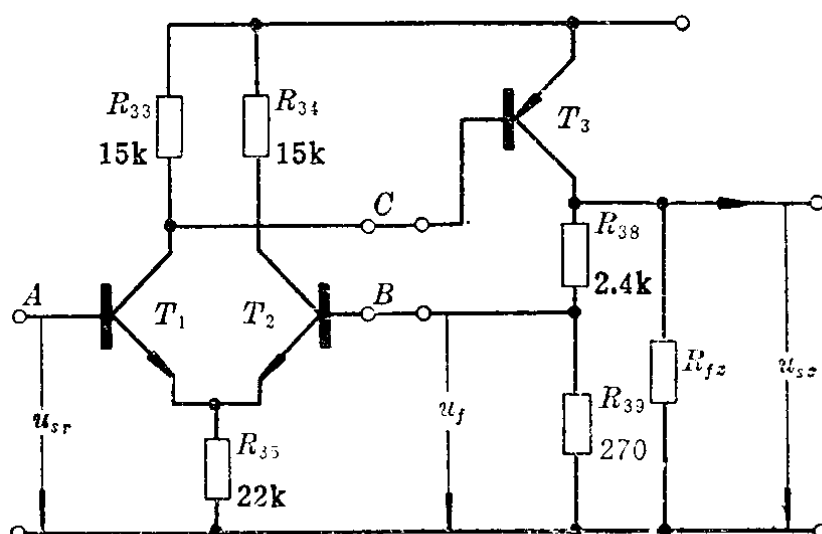


图 8-8 基本放大节的交流简化电路

R_{36} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 R_{32} 、 C_{17} 、 C_{18} 、 C_{16} 和 C_{14} 等均是滤波元件，对脉冲（交流）信号可看作短路。 D_{11} 是稳压管，只是为了保证静态工作点而加的，也同 C_{16} 一起看作短路。 D_{12} 二极管是限幅用的（改善过载特性），平时截止不起作用，故在简化图中也除去（看作开路）。 C_{15} 是改善输出信号前沿的，对放大的基本过程没有影响，也略去。 $R_{37} \gg R_{39}$ ，故 R_{37} 略去。 R_{fz} 代表负载电阻，就是下一个放大节的输入电阻，对第二、三放大节来说基本上等于 $10\text{ k}\Omega$ (R_{31} 、 R_{40})，因为放大节有负反馈后，本身的输入电阻很高，与 $10\text{ k}\Omega$ 相比可略去。

由此简化电路图可清楚地看出，放大作用是由一级差值放大器和一级普通的单管放大器完成的。

不考虑反馈时的电压放大倍数 K （也称开环放大倍数）不难计算，这可按差值放大级 B 输入端 (T_2 基极) 不加反馈信号的情况进行计算。下面计算开环放大倍数 K 。

在不考虑后级的影响并且两管静态工作点对称时，差值放大级的电压放大倍数 K_d 可按下式估算：