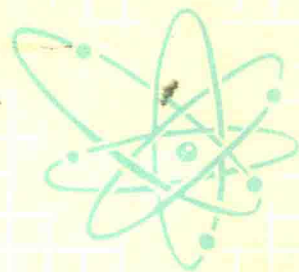
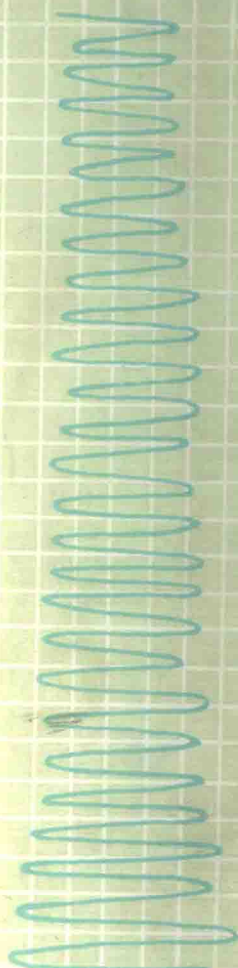


交流资料汇编

# 流线分析



原子能出版社

7  
842

## 内 容 简 介

本汇编是一次核工业流线分析现场会议交流资料的选编，其中包括了有关流线分析的方法研究、仪器装置及安装使用的工作经验，并验收了几种方法和仪器，供有关工厂推广使用。其中一部分资料曾经过生产实践考验，方法较为成熟；另一部分方法及设备则处于试验阶段，还未经过生产实践考验，离定型生产还有一段距离。本汇编可供从事核工业流线分析工作的同志及有关教学人员参阅、使用。

## 流线分析交流资料汇编

《流线分析》编辑组 编

原子能出版社出版

金华新华印刷厂印

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(只限国内发行)

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张 9 · 字数 220 千字

1974 年 1 月北京第一版 · 1974 年 1 月金华第一次印刷

印数 001—8,200 · 定价 1.10 元

统一书号: 15175 · 010

## 前 言

选用磷酸三丁酯-煤油萃取法流程的核燃料后处理工厂先后共设计和试制了十余种流线分析装置，用以监测工艺液流中的铀、钚、硝酸浓度和放射性裂变产物的强度。这些流线分析装置是将专用仪表的传感装置直接安装在液流管道上或走廊壁龛内的液流回路上，而将测量装置安装在相隔很远的控制室内，直接对生产系统中的工艺物料进行分析的一项新技术。与取样分析相比，它具有下列优点：不必经过任何化学处理，不破坏液流，能连续测量，快速及时地指导生产，可以大大节省人力物力，减轻工作人员的劳动强度以及可以在远距离操作以避免放射性射线的辐照等。流线分析的普遍采用也为提高生产过程的自动化程度提供了必要的条件。

已试制成的十余种流线分析装置，在后处理厂中经过相当长时间的考验后，证明多数装置的运行情况是良好的，目前正担负着控制分析的任务。但有些装置还存在一定的缺陷，有待于进一步改进和提高。个别的装置已被新设计的淘汰。

从试验应用结果来看，可以认为：

1. 在铀浓度流线分析装置中，以  $\text{Am}^{241}$  为放射源的  $\gamma$  吸收法测量水相或有机相中的高浓铀（100 克/升左右的范围）是一种很好的方法，它比直接比色法好；测量低浓铀（毫克/升量级）的流线分析装置尚待进一步改进。

2. 在钚浓度流线分析装置中，以 X 射线计数法（测定范围为 0.1~10 克钚/升）最为成功。对低浓钚（1 毫克钚/升以下）的测量，研制了三种装置，即由布带式间接测量发展到间隙式直接测量，再发展到转盘导样式测量。这三种装置中，第一种是可行的，第二种已被淘汰，第三种很有希望获得成功。

3. 电磁电导法测定硝酸浓度的流线分析仪对于较纯体系的酸度测定是完全可行的。

4. 裂变产物放射性强度测定的流线分析装置中，闪烁计数法测定总  $\gamma$  强度的监测仪运行情况良好，一直沿用至今；五道谱仪用于几种主要裂变产物组分的同时测定也是成功的。

## 目 录

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 前言.....                                       | i  |
| 五道谱仪介绍.....                                   | 1  |
| 五道谱仪用于裂片元素组分、钚浓度和总 $\gamma$ 放射性强度的流线联合测定..... | 19 |
| X 射线计数法流线测定钚浓度.....                           | 30 |
| 闪烁计数 $\gamma$ 吸收法流线测定高浓铀.....                 | 36 |
| 裂变产物总 $\gamma$ 强度的流线监测.....                   | 43 |
| $\gamma$ 流线装置设计经过介绍.....                      | 49 |
| 水冶工艺中铀的自动连续测定.....                            | 65 |
| 电磁浓度计连续测定液流酸度.....                            | 74 |
| 工艺尾弃液中微量铀的自动分析.....                           | 84 |

## 小 结 和 简 报

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| FXY-214 型铀液监测仪的应用情况小结 .....             | 93  |
| 钚浓度 $\alpha$ 测量流线装置研制小结.....            | 103 |
| 半导体探测器用于流线分析的探索性试验小结.....               | 111 |
| 酸度自动分析仪的研制.....                         | 116 |
| 测定有机相中微量铀的自动比色计.....                    | 123 |
| 镭浓集纯化工艺过程中 $\text{Ra}^{226}$ 的快速监测..... | 132 |
| 流线监测在 $\text{Pm}^{147}$ 生产中的应用.....     | 137 |

# 五道谱仪介绍

## 一、概述

为了适应流线快速分析,以利于对工艺过程的监测,并减少操作人员所承受的放射性剂量,在兄弟单位的大力协作和帮助下,我们试制成功了FH-435型全晶体管的带有模拟运算装置的五道谱仪。它可以同时测量被测样品中所包含的五种已知放射性同位素的含量,并可消除它们在测量中的相互影响。仪器由高压电源、线性放大器、五道分析器、五道计数率计、五道模拟运算器及定标器组成。它配有 $\phi 40 \times 40$ 毫米碘化钠晶体的 $\gamma$ 探头,可用于 $\gamma$ 能谱及计数测量,还配有 $\phi 40 \times 1$ 毫米薄铝窗碘化钠晶体的X探头,可用于X射线谱及 $\gamma$ 低能响应的测量。

## 二、仪器工作原理

五道谱仪所监测的五种放射性同位素都有各自的特征 $\gamma$ 射线谱或X射线谱,用 $\gamma$ 或X射线探头可以很容易测出它们的总谱,再通过五道能谱分析器,使其每道监测一种放射性同位素的全能峰,这样就可以同时测量五种不同的放射性同位素的强度。但是,每一道中除被测放射性元素的作用外,还有其他放射性元素的作用,为了消除这种相互的影响,我们采用了五道模拟运算器,其基本原理说明如下:

以 $\text{Ce}^{144}$ 对 $\text{Pu}^{239}$ 测量的影响为例来进行分析。图1为用X探头,在仪器条件不变的情况下分别测得纯 $\text{Pu}^{239}$ 和纯 $\text{Ce}^{144}$ 的能谱线。

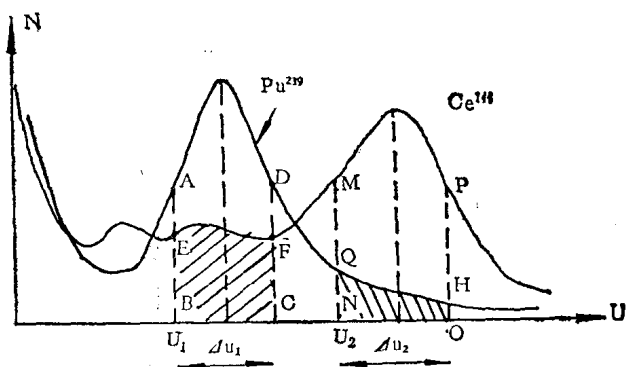


图1  $\text{Pu}^{239}$ 与 $\text{Ce}^{144}$ 的能谱线

假定用分析器第一道测量 $\text{Pu}^{239}$ ,其阈值为 $U_1$ ,道宽为 $\Delta U_1$ ;用第二道测量 $\text{Ce}^{144}$ ,其阈值为 $U_2$ ,道宽为 $\Delta U_2$ 。

从能谱图上可以看出当 $\text{Pu}^{239}$ 和 $\text{Ce}^{144}$ 同时存在时,它们是互有贡献的,即第一道除 $\text{Pu}^{239}$ 的计数外,还包括 $\text{Ce}^{144}$ 的计数,同样第二道也包含 $\text{Pu}^{239}$ 的X射线所造成的计数。因此从本道计数中扣除另一种元素所造成的额外计数是仪器设计中所要解决的主要问题。

从图中看出,纯 $\text{Pu}^{239}$ 在第一道的计数为 $n_1$ ,即谱线面积 $ABCD$ ,设它在线性率表中显示的直流电压为 $C_{10}$ 。纯 $\text{Pu}^{239}$ 在第二道的计数为 $n_{21}$ ,即谱线面积 $QHON$ ,设它在线性率表中显示的直流电压为 $C_{21}$ 。

用  $\alpha_{21}$  代表上述二个数值的比值, 则

$$\alpha_{21} = \frac{n_{21}}{n_1} = \frac{\text{面积 } QHON}{\text{面积 } ABCD} = \frac{C_{21}}{C_1},$$

因此

$$C_{21} = \alpha_{21} C_1.$$

在一定浓度范围内, 当  $\text{Pu}^{239}$  浓度变化时,  $n_1$  变化,  $n_{21}$  也同比例地变化, 故  $\alpha_{21}$  为常数。

同理可得

$$\alpha_{12} = \frac{n_{12}}{n_2} = \frac{\text{面积 } EBCF}{\text{面积 } MNOP} = \frac{C_{12}}{C_2},$$

因此

$$C_{12} = \alpha_{12} C_2.$$

当  $\text{Pu}^{239}$  和  $\text{Ge}^{144}$  同时存在时, 其在第一、二道的计数分别为二者所引起的计数的代数和, 即第一道计数

$$N_1 = n_1 + n_{12},$$

这时第一道线性率表显示出的直流电压为

$$V_1 = C_1 + C_{12} = C_1 + \alpha_{12} C_2. \quad (1)$$

第二道计数

$$N_2 = n_2 + n_{21},$$

第二道线性率表显示的直流电压为

$$V_2 = C_2 + C_{21} = C_2 + \alpha_{21} C_1. \quad (2)$$

由此得联立方程式

$$V_1 = C_1 + \alpha_{12} C_2,$$

$$V_2 = C_2 + \alpha_{21} C_1.$$

解方程得

$$C_1 = V_1 - \alpha_{12} C_2, \quad (3)$$

$$C_2 = V_2 - \alpha_{21} C_1. \quad (4)$$

因此在两个放射性元素同时存在时, 要求得其中某个元素所造成的计数就变成解上述二元一次联立方程的问题。在五个放射性元素同时存在时就变为解下列五元一次联立方程

$$\begin{aligned} C_1 &= V_1 - \alpha_{12} C_2 - \alpha_{13} C_3 - \alpha_{14} C_4 - \alpha_{15} C_5 \\ C_2 &= V_2 - \alpha_{21} C_1 - \alpha_{23} C_3 - \alpha_{24} C_4 - \alpha_{25} C_5 \\ C_3 &= V_3 - \alpha_{31} C_1 - \alpha_{32} C_2 - \alpha_{34} C_4 - \alpha_{35} C_5 \\ C_4 &= V_4 - \alpha_{41} C_1 - \alpha_{42} C_2 - \alpha_{43} C_3 - \alpha_{45} C_5 \\ C_5 &= V_5 - \alpha_{51} C_1 - \alpha_{52} C_2 - \alpha_{53} C_3 - \alpha_{54} C_4 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  为待定的未知数;  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  为线性率表相应道显示的直流电压值;  $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \dots, \alpha_{54}$  为实验确定的已知系数。

我们采用了五道模拟运算器来解此类方程。当将五道分析器各道的阈值和道宽确定后, 就可由五道模拟运算器直接给出  $C_1, C_2, \dots, C_5$  的结果, 这就排除了他们的相互计数影响, 得到了它们各自的准确计数值。

### 三、线路说明

在线路设计中,为考虑线路标准化和仪器通用性,除五道模拟运算器外,高压电源、自动定标器、线性放大器均采用我厂生产的单道谱仪的成型部件,而五道分析器和五道率表均采用单道分析器的线路单元,这样有利于生产和维修。

#### 1. 线性脉冲放大器

线性脉冲放大器(图2)将探测器的微弱讯号脉冲进行不失真的线性放大,再送到五道分析器进行分析。它由衰减器、第一放大环、第二放大环、第三放大环、倒相级和射极跟随器等六个单元组成,放大倍数为1000倍,借助衰减器可分级调到10倍。其第一、二环均由一级差分放大器和一级单管放大器组成10倍的电压负反馈放大环节,第三环因信号幅度较大,故倒相放大器是由两个互为负载的放大级组成,用以对正负脉冲分别进行放大,倒相器( $T_{17}$ )保证在负脉冲输入的情况下在输出端获得正脉冲,射极输出器( $T_{18}$ )保证放大器有较小的输出阻抗。

此放大器各环输入级均为差分级,环内级间均为直接耦合,输出有负向箝位,因此有较好的抗过载、抗阻塞特性。同时环内还分别采取了较深的直流负反馈和交流负反馈,前者当温度变化及其他因素影响时使线路直流工作点漂移极小,后者除满足足够大的放大倍数外,且能保证放大倍数有较好的线性、较高的稳定性及较小的温度系数。而且各环倒相放大级的射极均接有稳压二极管,除保证适当的直流工作点外,还由于稳压管动态内阻非常小,所以使每环有足够的开环放大倍数,保证了深的负反馈。

此放大器由 $\pm 24$ 伏直流供电,保证放大器有较宽的线性输出范围,同时环间都有去耦电路,因此消除了通过电源造成的各环间的寄生反馈。其主要指标:

- (1) 最大输出幅度 $>12$ 伏;
- (2) 非线性失真系数(0.1~10伏) $<0.3\%$ ;
- (3) 放大倍数稳定性:八小时连续工作 $\Delta A/A < 0.3\%$ ,温度系数: $\Delta A/A < 0.1\%/^{\circ}\text{C}$ ;
- (4) 过载100倍时,放大器阻塞时间小于0.5微秒;
- (5) 输出脉冲前沿 $<0.3$ 微秒;
- (6) 输出端噪声 $<30$ 毫伏(峰~峰)。

#### 2. 五道脉冲幅度分析器

五道脉冲幅度分析器(图3)是用来测量线性放大器输出的脉冲幅度分布的仪器。其输出一路送至五道线性率表,一路送至定标器。它由两个输入级(图4)和五个上下甄别组成的单道脉冲幅度分析器(图5)组成。其中第五个分析器插入了一个与下甄别完全相同的中甄别,使得第五道可作系统的谱线峰位稳定之用(图6,7)。

输入级由两个怀特跟随器组成,用以获得好的线性和高输入阻抗。两个跟随器之间有一个二比一的分压器用来将甄别范围由5伏扩大到10伏(图4)。

五个由上下甄别组成的单道脉冲幅度分析器(图5),其 $T_1, T_2$ 组成交流耦合施密特电路(下甄别),截止管 $T_1$ 的集电极电阻为150欧姆,这样使滞后大大减小,从而获得较稳定的高灵敏阈(但此电阻值如取得过小,闭环 $K\beta$ 减小,使触发特性变坏,翻转速度变慢,

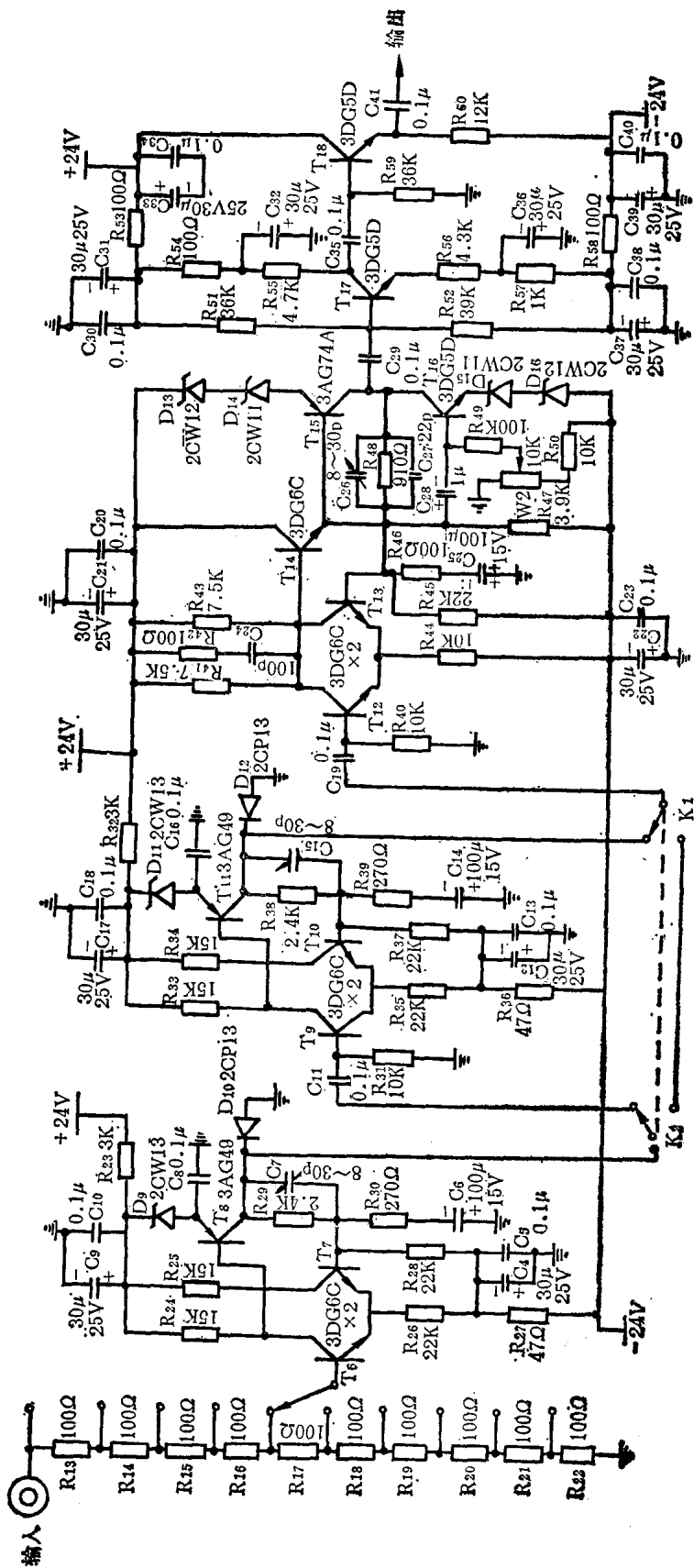


图 2 FH-430 线性脉冲放大器线路图

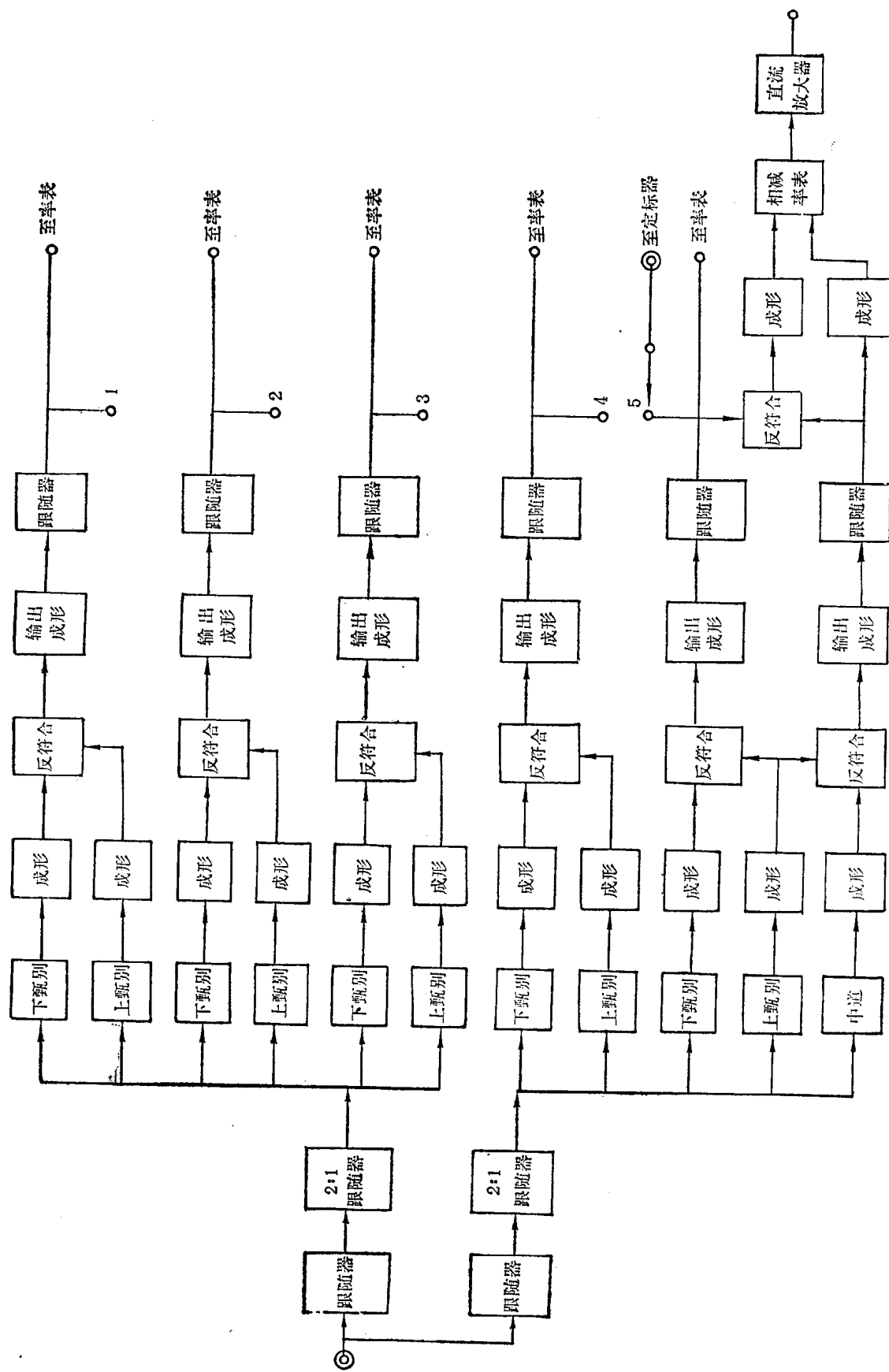


图 3 五道分析器方块图

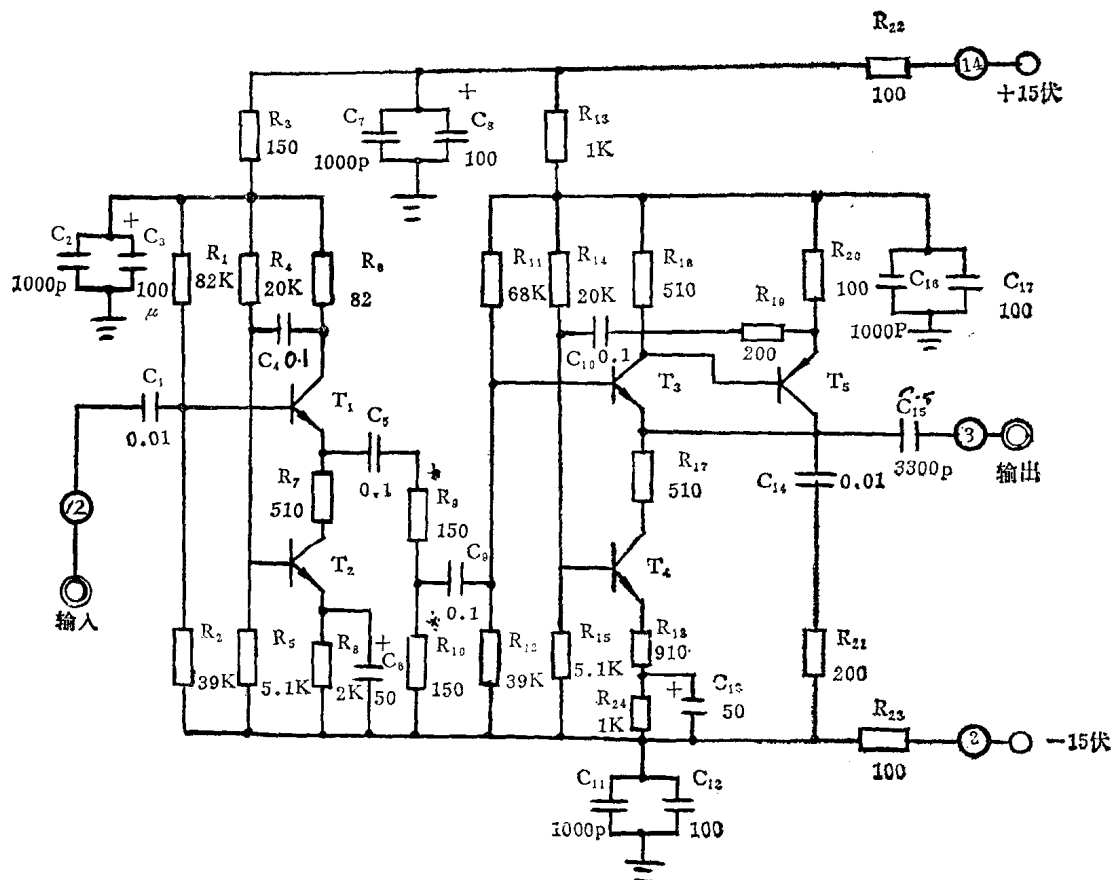


图 4 五道分析器输入级

\* 为金属膜电阻。

选取时应全面考虑)。T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> 一为硅管, 一为锗管, 对温度变化引起  $V_{be}$  的变化有相互补偿的作用, 因而获得较高的阈值及道宽的稳定性。T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub> 组成单稳态电路, 将甄别输出的脉冲成形为 0.5 微秒宽度的脉冲, 然后微分取其前沿, 则脉冲延迟 0.5 微秒, 这样可保证反符合电路工作的可靠性。上甄别是由 T<sub>12</sub>, T<sub>13</sub> 组成施密特电路, T<sub>14</sub>, T<sub>15</sub> 组成成形为 1 微秒脉宽的单稳态电路, 在施密特电路与单稳态电路之间采用微分网络的耦合电路, 以便对输入信号有较宽的幅度及宽度的适应性。T<sub>7</sub>, T<sub>8</sub> 组成反符合门, T<sub>7</sub> 起开关作用, 在静态时, T<sub>7</sub> 导通。如上甄别未被触发, 则下甄别输出成形脉冲经微分, 其负向脉冲被 T<sub>8</sub> 放大, 然后触发由 T<sub>9</sub>, T<sub>10</sub> 组成的输出成形器, 在 T<sub>11</sub> 射极产生 +6 伏的脉冲输出。如果输入脉冲幅度大到使上、下甄别同时触发, 则上甄别输出的成形脉冲加在 T<sub>7</sub> 基极, 使 T<sub>7</sub> 截止, 这使 T<sub>8</sub> 的射极如断开似的, 因此由下甄别输出加至 T<sub>8</sub> 基极的脉冲对 T<sub>8</sub> 将不起作用, 亦即被反符合掉而无输出。

利用施密特电路做甄别器, 电路简单, 阈值范围大, 并且有较高的阈值稳定性, 较好的阈线性。缺点是用简单办法消除滞后使甄别器触发特性变坏, 但由于在它后面接入了阈值较灵敏且较稳定的单稳态成形电路, 使此缺点得到一定克服。其主要性能指标如下:

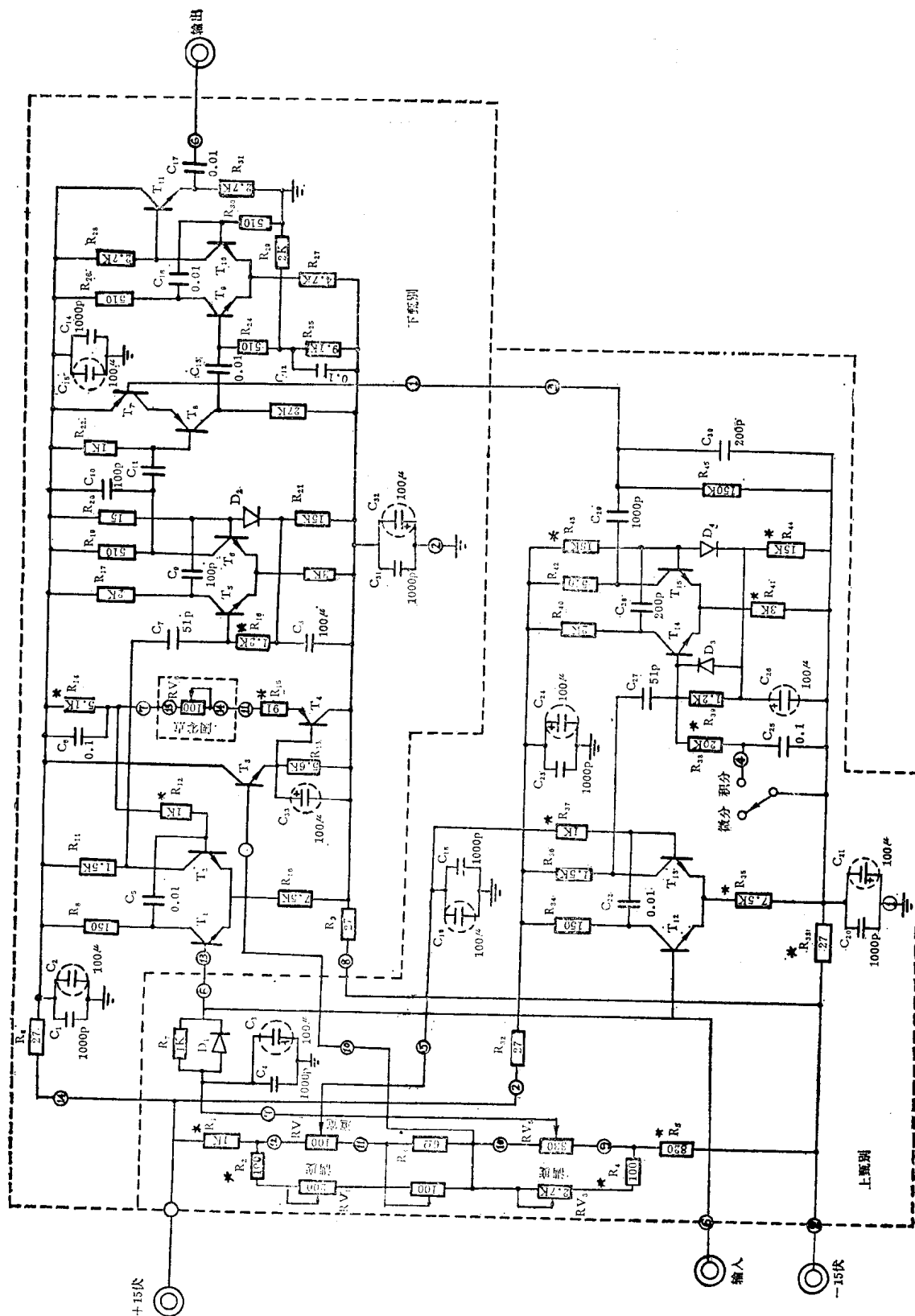


图 5 五道分析器 1~4 道线路图

- (1) 所有硅管为 3 DG6D<sub>3</sub>; (2) 所有锗管为 3 AG49; (3) 二极管 D<sub>1</sub>, D<sub>4</sub> 为 2 AK10, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> 为 2 CK12; (4) 有\*号者为金属膜电阻;  
(5) 调零点电位器在上甄别板内; (6) 图内圆圈数字表示印刷板出线端, 虚线表示印刷板分界线。

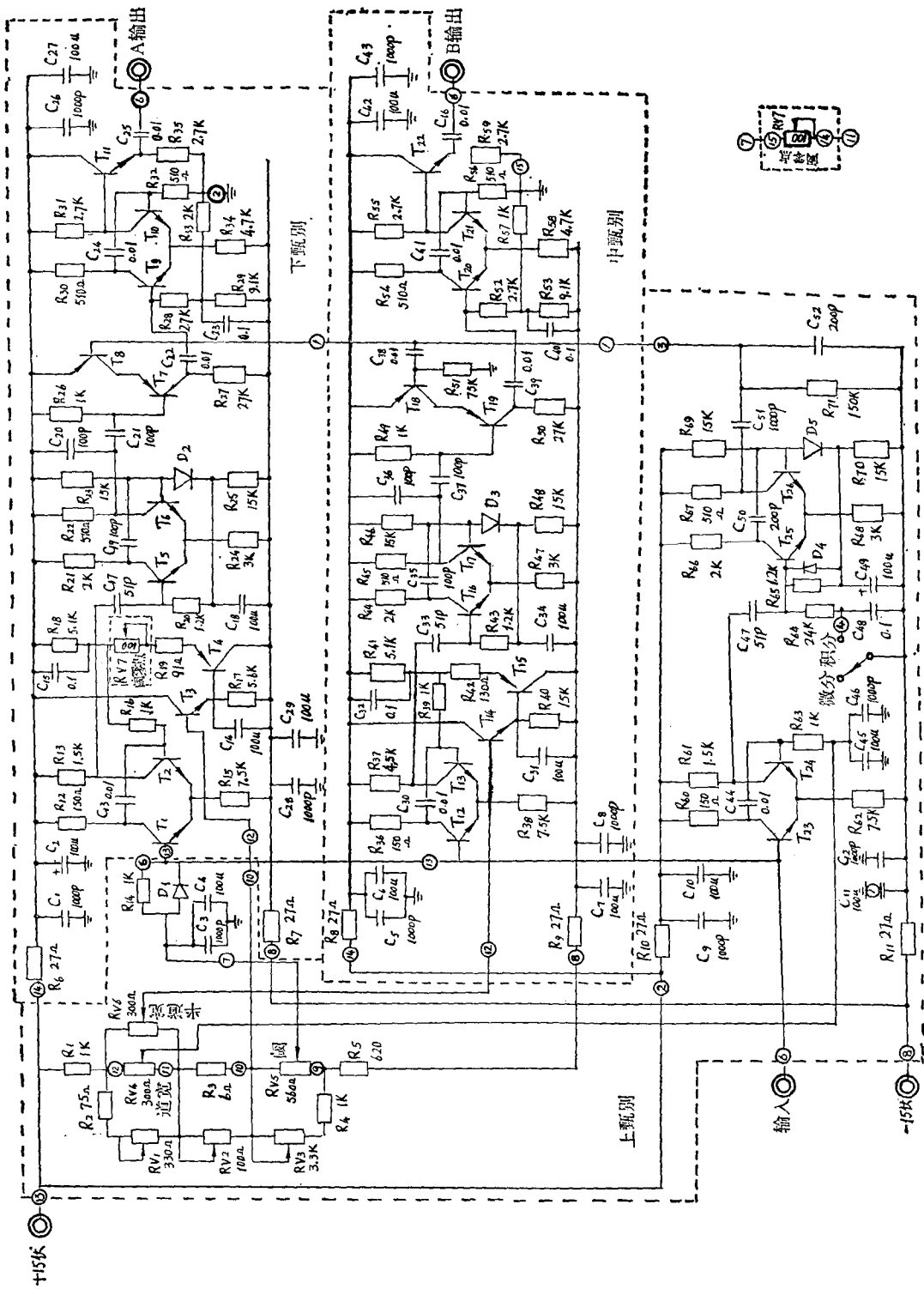


图 6 五道分析器第五道线路图之一  
 (1) 图上圆圈内数字表示印刷板出线端; (2) 调零点电位器在上甄别板上, 出线端如图所示。

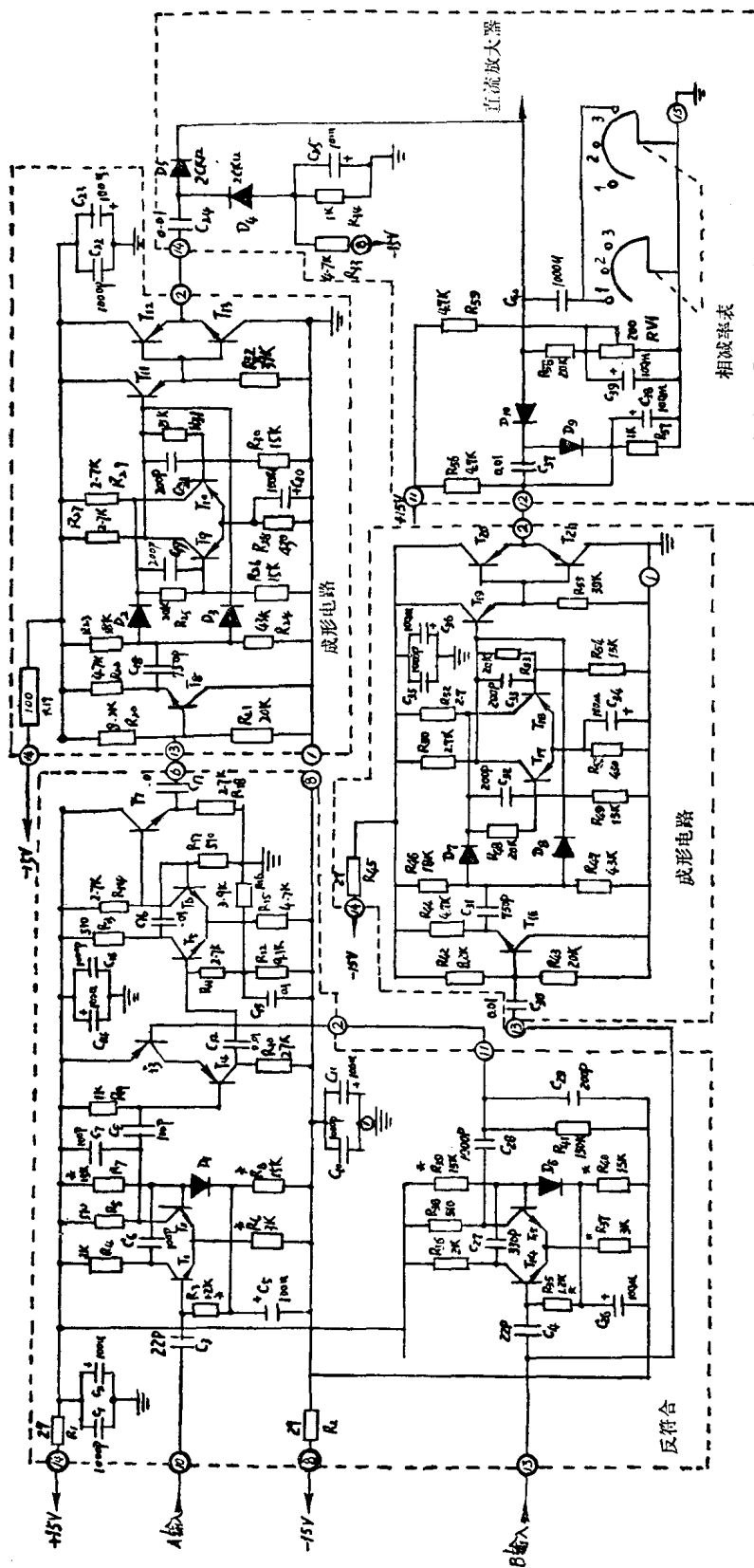


图 7 五道分析器第五道线路图之二

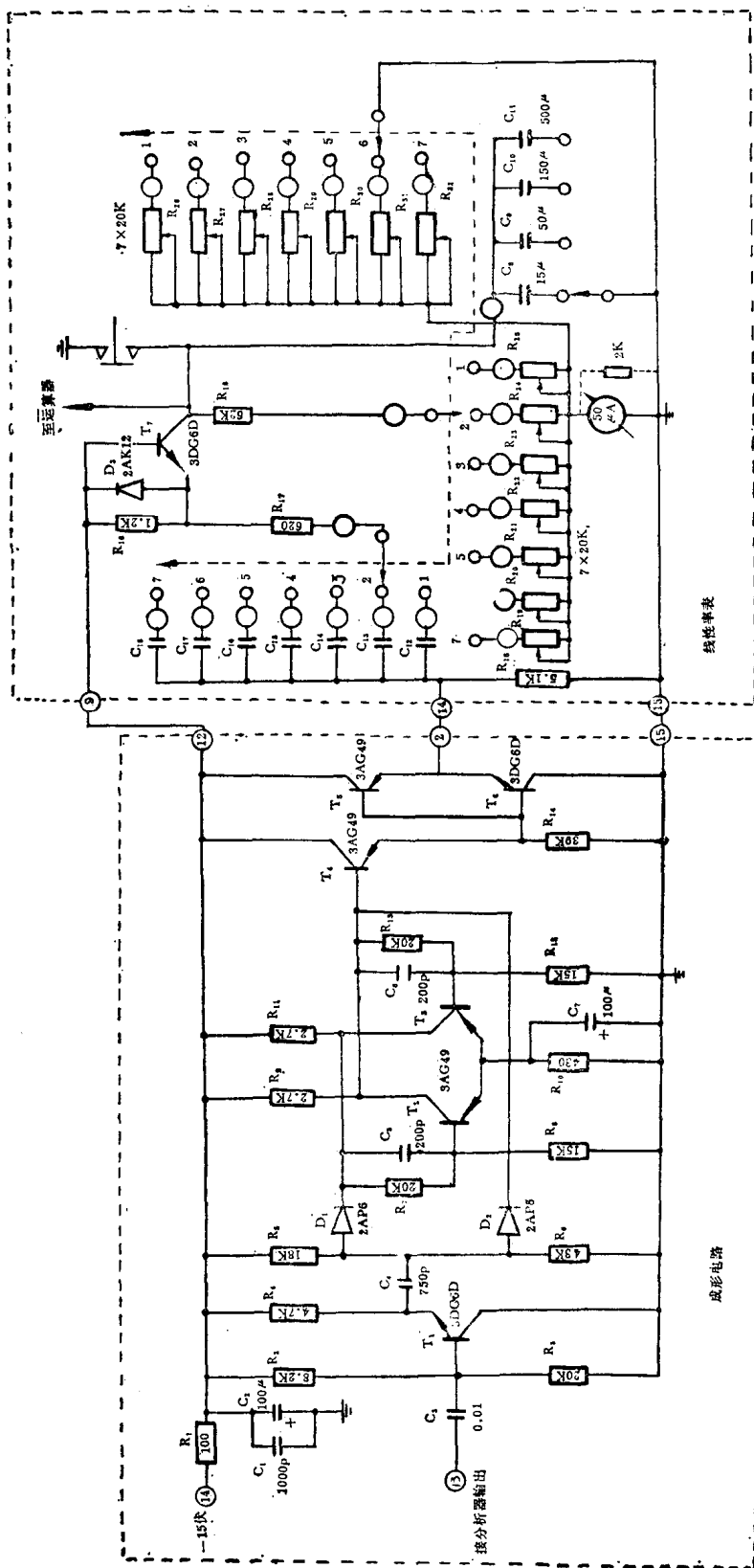


图 8 五道计数率计线路图

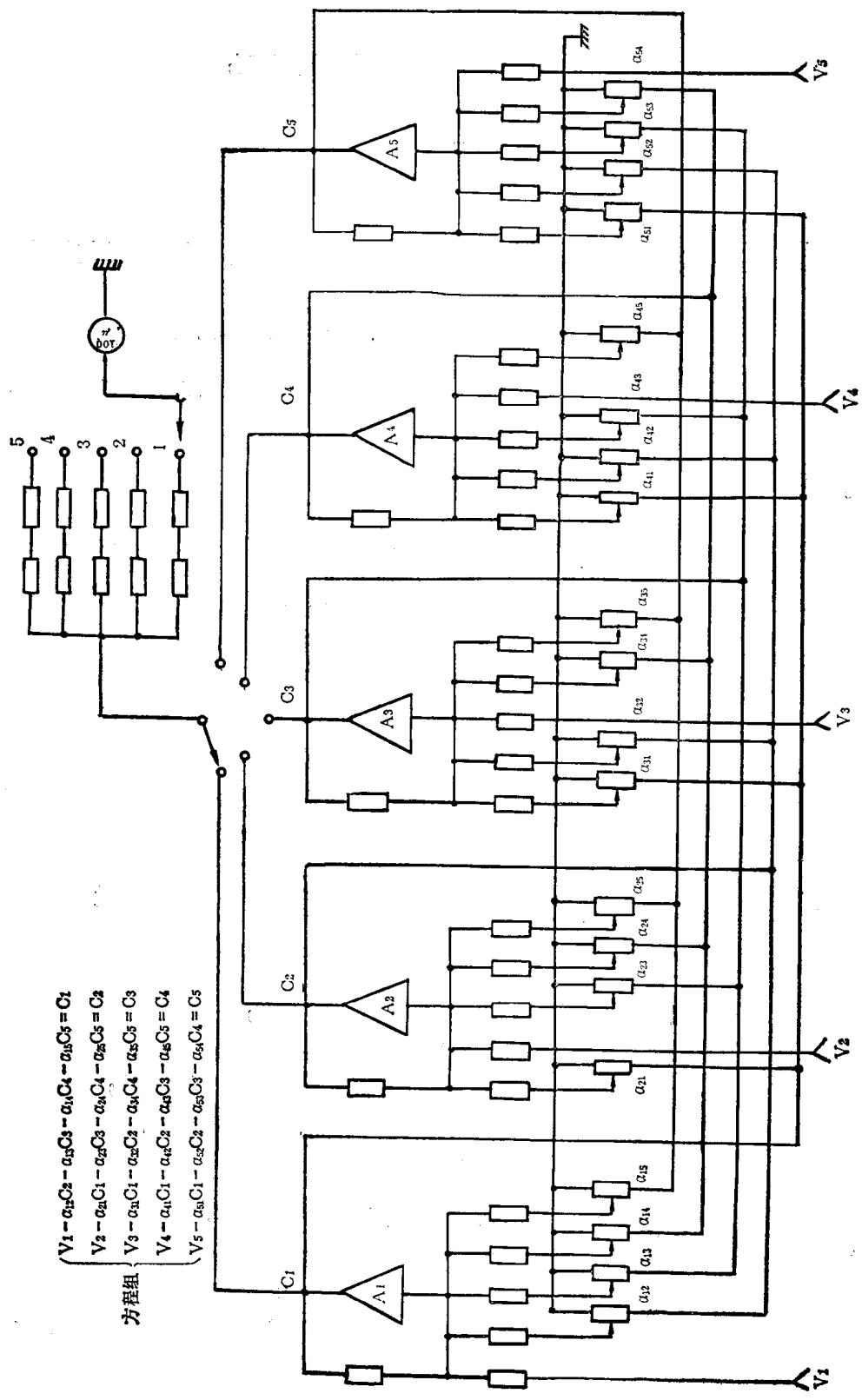


图 9 五道模拟运算器方块图  
零点电位器图上未标明。

- (1) 阈值 0.1~10 伏连续可调;
- (2) 道宽 10 毫伏~2 伏连续可调;
- (3) 阈值非线性 $<0.6\%$  (0.1~9 伏范围内), 道宽非线性 $<2\%$ ;
- (4) 阈值、道宽稳定性 $<10$  毫伏/8 小时;
- (5) 阈值、道宽温度稳定系数 $<1$  毫伏/ $1^{\circ}\text{C}$ ;
- (6) 分辨时间 $<1$  微秒。

### 3. 五道计数率计

五道计数率计由五个独立的线性率计组成 (图 8), 用以将分析器输出的脉冲信号转换成直流电压, 并加入到五道模拟运算放大器中。

线性率计由  $T_1$  射极跟随器、 $T_2, T_3$  双稳态成形级、 $T_4, T_5, T_6$  两个射极跟随器及  $T_7, D_3, C_8, C_2$  组成的唧筒电路组成。

由于  $T_7$  为硅管, 具有很高的集电极电阻值, 这样积分电阻可以取得很大, 因此积分电路具有很大的时间常数, 可减小统计涨落, 同时硅管的放大系数稳定, 因此线性率表的稳定性较好。

### 4. 五道模拟运算器

五道模拟运算器是将五道线性率表输出的直流电压按照一定的代数方程进行模拟运算的装置, 它由五个独立的运算放大器和按一定规则排列的二十个具有精密刻度的十圈电位器所组成 (图 9)。

为了说明五道模拟运算器能模拟解答我们在原理中所得出的五元一次联立方程, 在此

对五道模拟运算器的核心部分——运算放大器作一简单介绍:

运算放大器实质上是一个带负反馈的工作于闭环的直流放大器, 其方块图如图 10。

由方块图可见它有如下特性:

(1) 其输出与输入之比为常数 设

$V_1$ ——输入电压;

$V_2$ ——输出电压;

$R_1$ ——输入端电阻;

$R_2$ ——反馈电阻;

$R_i$ ——放大器内阻 (输入电阻);

$K$ ——放大器开环放大倍数。

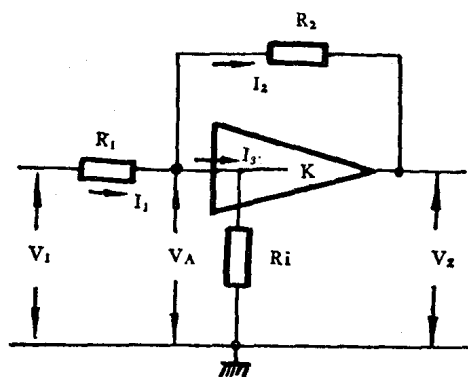


图 10 运算放大器方块图

$$I_1 = I_2 + I_3,$$

$$\frac{V_1 - V_A}{R_1} = \frac{V_A - V_2}{R_2} + \frac{V_A}{R_i}, \text{ 又 } V_2 = -KV_A,$$

求得

$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1} \left[ \frac{1}{1 + \frac{1}{K \frac{R_1}{R_1 + R_2}} + \frac{1}{K \frac{R_i}{R_2}}} \right].$$

当  $K$  和  $R_i$  足够大时,  $\frac{1}{K \frac{R_1}{R_1+R_2}}$  和  $\frac{1}{K \frac{R_i}{R_2}}$  就可忽略不计, 则上式可简化为

$$\frac{V_2}{V_1} \approx -\frac{R_2}{R_1}.$$

当  $R_2=R_1$  时, 则

$$V_2 \approx -V_1.$$

(2) 输出电压为输入电压的代数和 当放大器输入多个讯号电压  $V_1, V_2, V_3, \dots$  则

$$V_{\text{出}} = -\frac{R_2}{R_1} (V_1 + V_2 + V_3 + \dots) = -\frac{R_2}{R_1} \sum V_{\lambda},$$

如  $R_1=R_2$ , 则

$$V_{\text{出}} = -\sum V_{\lambda} = -(V_1 + V_2 + V_3 + \dots).$$

由于运算放大器具有上述两个特性, 所以当和二十个十圈电位器组成五道模拟运算器时, 由五道运算器方块图(图 8)可以看出, 对于第一道(即第一个运算放大器)其输入端所加电压除由五道率表第一道直接加入的  $V_1$  外, 还由第二、第三、第四和第五运算放大器输出通过十圈电位器加入的电压  $\alpha_{ni}C_i$ 。在设计时已经取  $R_1=R_2$ , 对第一道则可直接写出

$$-C_1 = \sum V_{\lambda} = V_1 - \alpha_{12}C_2 - \alpha_{13}C_3 - \alpha_{14}C_4 - \alpha_{15}C_5,$$

同样对第二、三、四、五道亦可写出

$$-C_2 = V_2 - \alpha_{21}C_1 - \alpha_{23}C_3 - \alpha_{24}C_4 - \alpha_{25}C_5,$$

$$-C_3 = V_3 - \alpha_{31}C_1 - \alpha_{32}C_2 - \alpha_{34}C_4 - \alpha_{35}C_5,$$

$$-C_4 = V_4 - \alpha_{41}C_1 - \alpha_{42}C_2 - \alpha_{43}C_3 - \alpha_{45}C_5,$$

$$-C_5 = V_5 - \alpha_{51}C_1 - \alpha_{52}C_2 - \alpha_{53}C_3 - \alpha_{54}C_4.$$

此联立方程式正好与仪器工作原理中所要求解的五元一次联立方程相一致, 因此我们说所设计的五道模拟运算器完全正确地解答了我们在仪器原理中所要解的五元一次联立方程。

为了保证运算准确, 在运算放大器设计时, 除了满足开环放大倍数  $K$  足够大外, 还得保证放大器零点漂移足够小。为此本谱仪的运算放大器采用了交流调制型的直流放大器, 其方块图如图 11, 具体线路见图 12。

交流调制是将输入的直流电压变成交流电压以便进行交流放大, 此部分包括晶体管  $T_1, T_2$  及  $T_{p1}$  脉冲振荡变压器组成的自激间隙振荡器和受振荡脉冲控制而周期性启闭的开关晶体管  $T_3$ 。

交流放大是将已调制的交流电压放大。此部分包括由晶体管  $T_4 \sim T_7$  组成的两级串级交流放大器。

交流解调是将被放大的交流电压解调成直流电压。解调管是  $T_8$ , 控制解调管基极的脉冲亦由脉冲振荡变压器供给。由于控制调制管和解调管的脉冲极性是相反的, 所以当调制管  $T_3$  受正脉冲控制将直流电压变成交流电压并被放大经  $T_7$  输出时, 恰好此时解调管

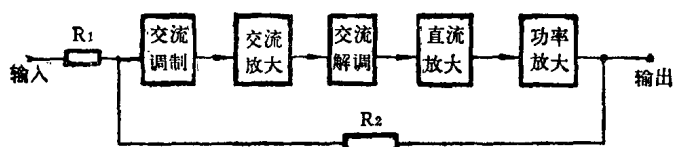


图 11 交流调制型直流放大器方块图