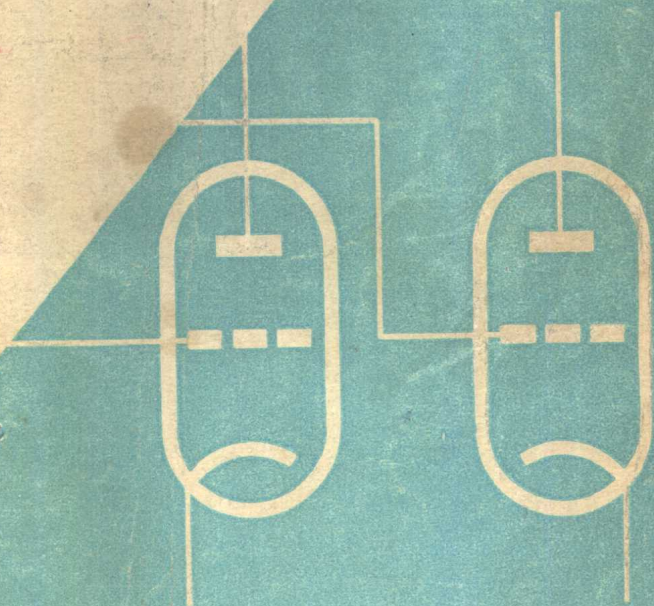




电子管 直流放大器

(苏联) И. Я. 勃列依多著

钟 佐 华 译



人民邮电出版社

4
8

И. Я. Брейдо
ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ
СИГНАЛОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Госэнергоиздат, 1960

内 容 提 要

本书研究的直流放大器，主要用来放大具有恒定极性（即单方向）的微弱电信号，信号的电流或电压能在许多小时到十分之几微秒的间隔时间内变化。这种放大器广泛用于生产过程自动控制和调节设备中。

本书对把无线电电子设备用于工业生产自动控制系统感兴趣的人员及具有一定水平的业余无线电爱好者，均有参考价值。

电子管直流放大器

著者：苏联 И. Я. 勃列依多
译者：钟 佐 华
出版者：人民邮电出版社
北京东四 5 条 13 号
(北京市书刊出版业营业许可证出字第 048 号)
印刷者：南京人民印刷厂
发行者：新华书店

开本 787×1092 1/32 1964 年 5 月南京第一版
印张 2 24/32 页数 44 1964 年 5 月南京第一次印刷
印刷字数 60,000 字 印数 1—13,650 册

统一书号：15045·总1388—无385

定价：(科 4) 0.32 元

导 言

現代工业中广泛应用着生产过程的自动控制和調节系統。在工业走上工艺过程全面自动化和尽量运用遙控和遙測系統的道路的今天，这种系統的应用，将特別迅速地扩大。

自动控制系统包含下列的基本元件：

1. 传感器 用以将这个或那个过程的参数以电信号的形式表現出来。传感器的典型例子是：人所共知的热偶（溫度传感器），光电元件（照度传感器）。

2. 放大器 用以放大信号功率。放大器常常由一些单独部分组成：电流或电压放大器，功率放大器。

3. 执行机构 用以調节过程的进程，并为由传感器所发出的、經過放大的信号所控制。

4. 控制仪器 即指示仪器或記錄仪器。

传感器所发出的信号，常常是大小变化緩慢且有恒定方向的电流（所謂直流信号）。这些电流的值通常是在 10^{-15} 安— 10^{-6} 安的范围內，然而要使測量或記錄用的控制仪器动作起来，却需要数量級达 10^{-4} 安的电流；而要控制执行机构则需要大于 10^{-2} 安的电流。

将这种信号加以适当放大是由称为直流放大器 (УИТ) 的无綫电电子設備来实现的。虽然这类放大器的輸入信号只在方向上是恒定不变的，但是直流放大器的名称已經成了用得广泛的技术上的习惯用語，因此我們以后也就采用这个名称。直流放大器对自动控制系统之所以具有重要意义，还因为它们們在低頻范围內具有几乎是理想的相位特性，而对于控制信号來說，低頻是其主要分量。

目 录

导言

第一章 直流放大器输入信号的传感器	1
第二章 直流信号放大的基本问题	6
1. 电子管直流放大器的特点	6
2. 输入变换器	7
3. 直流放大器的主要技术特性	18
第三章 直流放大器的输入级	20
4. 对输入级电子管的要求	20
5. 栅极电流和减小它的方法	21
6. 静电计状态 II	25
7. 栅极电流的测量	26
8. 高欧电阻	28
9. 零点漂移	29
10. 输入级的基本线路	33
第四章 直流放大器的中间级和末级	42
11. 直接放大的不平衡直流放大器的级间耦合线路	42
12. 中间直流电压放大器的平衡线路	49
13. 漂移的补偿和平衡级的对称	53
14. 直接放大的直流放大器的输出级	55
15. 具有输入断续器和调制器的直流放大器的中间级和末级	58
16. 直流放大器中的反馈	60
第五章 在实际上应用的«直流»信号放大器和直流 信号测量器	64
17. 多量程微微安计	64
18. 有负反馈的多量程直接放大直流放大器	67
19. 有输入断续器的直流放大器	68

20. 有輸入电容調制器的直流放大器	71
21. 寬頻帶直流放大器	73
22. 直流放大器的漂移自动补偿和零电平自动調节	75
23. 直流放大器的饋电、結構、安装和装配的基本問題	79
参考书刊	82

第一章 直流放大器输入信号的传感器

生产过程的控制和自动调节系统的大部分可以用图 1 所示的两种基本线路来表示。正如引言中所提到的，许多传感器都产生变化较慢的、具有恒定方向的微弱电流。为了放大这些电流，就要利用直流放大器。兹列举在工业和科学中应用最广泛的传感器的型式如下。

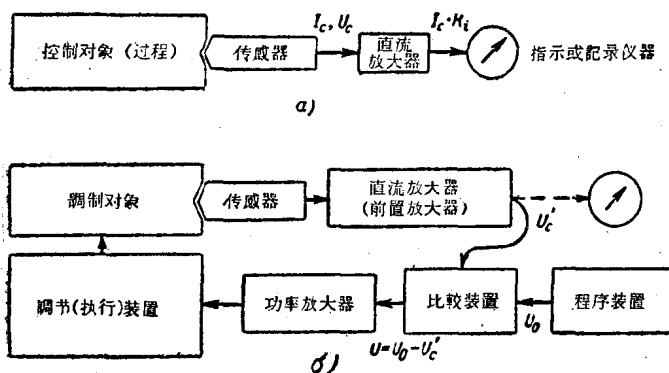


图 1 a) 控制 (测量) 设备方块图;
b) 自动调节设备方块图

为了控制和调节热过程，通常用热电偶或热敏电阻作传感器。热电偶（如为金属所制成）的灵敏度，在内阻通常小于 100 欧时为每 100°C 1—2 毫伏。以热敏电阻作成的传感器，产生的信号显著地依赖于它的材料和所连接的电路。金属材料的传感器，温度每变化 1°C ，电阻约变化 0.4%；半导体温度传感器的灵敏度要比金属温度传感器高得多。

为了控制机械应力，采用所谓张线式传感器 (тензодатчи-

ки)。它們可分为三种主要类型：第一种类型带有变形时发生变化的电阻；第二种类型具有变形时发生变化的磁性能；第三种类型是压电的，在变形时其两极出现电荷。第一类和第二类张线式传感器的信号电压，在内阻较小时约为 1 毫伏；而压电传感器，当直流放大器输入端具有很高的电阻 (10^{11} — 10^{12} 欧) 和小的电容时，则能产生 1 伏左右的电压。

某些溶液的浓度和化学成分是利用能对氢离子浓度起反应的 pH 传感器来进行控制的。这些传感器，其电极的主要物质有玻璃薄膜防护，以免和溶液相接触。当灵敏度为 0.5 伏左右时，要求直流放大器具有很高的输入阻抗 (10^{11} — 10^{13} 欧)。

许多生产过程都利用光电传感器来进行控制。其中有：a) 三种光电元件（即具有外光电效应的光电元件——真空光电元件，具有障层的光电元件——障层光电元件和光敏电阻）和 b) 光电倍增管。

真空光电元件的特性最为稳定，因而应用很广。在精密设备，例如在自动光谱分析仪中，也应用真空光电元件。真空光电元件的灵敏度为 20—80 微安/流明。但是因为工作光通量一般很小，所以给出的电流在 10^{-7} — 10^{-13} 安之间。由于真空光电元件的内阻大，有可能采用高输入阻抗的直流放大器，正如以后将要指出来的，这就便于放大如此微弱的电流。

障层光电元件（硒、氧化铜、锗光电元件等）通常具有低的电阻值，而当照度为 100 勒时，产生 2—4 至 100—200 毫伏的电动势。为了保证障层光电元件的光电流与照度之间具有线性关系，要求低的负荷电阻。因此，电子管放大器通常通过相应的变换器再与这种光电元件相接。光敏电阻基本上也是这样。

为了在光信号的强度特别微弱的情况下进行工作，可采用

光电倍增管(ΦЭУ)。由于光电倍增管具有高輸出阻抗和大的輸出信号，故有可能采用具有高阻輸入的直流放大器。在这里讓我們提醒一下，將直流放大器和光电倍增管組合起来，就可构成用来測量非常微弱的光輻射（其微弱程度直至 10^{-12} 流明，如星光）的最灵敏而且足够紧密而万能的仪器。

现在为了測量一系列的生产过程指数（液面高度和液体密度，物质的厚度、加工质量和顏色，等等）所采用的基本上是丙种和乙种的放射綫。这些射綫的传感器（检测器）是电离器件——气体放电計数器，电离箱以及一系列閃光器，例如碘化鈉晶体——与光电倍增管的組合。

气体放电計数器，在丙种和乙种射綫作用下产生脉冲，其平均頻率与作用於計数器的輻射的强度成正比。利用简单的积分电路，可将脉冲变成恒向电流；电流的大小与脉冲的平均頻率成正比，通常在 10^{-5} — 10^{-8} 安之間。用比較简单的直流放大器就可測量这些电流。

在电离箱中，在穿进来的輻射作用下，就有数量級为 10^{-16} — 10^{-7} 安的电流流动；这些电流与輻射强度、电离箱容积以及充滿其中的气体的压力成正比，同时也与气体的成分、箱壁的材料有关。电离箱的内阻是很大的，这就使得有可能利用高阻輸入的直流放大器。为了放大小于 10^{-12} 安的电流，采用具有特殊的靜电計輸入級的直流放大器。將电离箱与直流放大器組合起来就构成最准确和最可靠的、測量放射綫强度的仪器之一。

在电真空工业中，«真空控制»更准确地測定在 10^{-3} — 10^{-8} 毫米水銀柱範圍內的微弱气压具有重大的意义。測定这些气压，要依靠电离真空計来进行。以与欲測定气压的容器直接相連的变形电离箱充当传感器。將产生电离的輻射源安放在电离箱內。在稳定的条件下，电离箱的电流与气压成正比。因此，

接在直流放大器輸出端的指示儀器的標度盤可直接標度為壓力單位。

產生電離的輻射源可由被網狀陽極包圍的熾熱陰極充當（電子使氣體電離，而離子飛越柵網到達電離箱的“集電極”），或由放射甲種射線的放射性制品充當[這時，電離箱（真空計傳感器）有時也稱為甲種射線電離器（альфатрон）]。在氣體中形成的正離子，為與直流放大器輸入端相連接的帶負電的集電極所收集。

放大所謂“生物電流”，即放大在組織和器官的生機活動過程中，直接在組織和器官中發生的電信號的任務，則有些特殊的地方。這些信號的變化時間由一秒到十分之幾毫秒，而它的電壓則近於由 0.5 微伏（腦電流和神經電流）到 0.1 伏（心臟電流）。利用適當的電極（非極化的）將直流放大器的輸入端接到受檢驗的器官上。直流放大器的輸入阻抗可以是不高的（在 10^3 — 10^6 歐左右）；由於信號功率很小，所以就严格要求放大器具有高的穩定性和小的噪聲。

在表 1 中給出用以控制各種不同過程的傳感器的系統及其主要參數。

研究一下表 1 所列举的作為直流放大器輸入電路的元件的傳感器，就可以把它們的大部分按其電的性能分為三類。第一類傳感器稱為電流傳感器。它們具有很大的內阻，能够在極高阻（ 10^6 — 10^{13} 歐）負載上產生 10^{-1} — 10^1 伏左右的電壓，而且傳感器電流與負載電阻無關。第二類傳感器可以稱為電壓傳感器。它們具有不大的內阻，在低阻（ 10^2 — 10^4 歐）負載上產生 10^{-8} — 10^{-2} 伏電壓，而它們的特性與負載有很大的關係。第三類傳感器包括壓電傳感器和電容傳感器。由於正是這類傳感器電極上的電荷數值反映它們所控制的現象的強度，因此可以稱

表 1

被控或被调整的过程和现象的参数	传 感 器	传 感 器 信 号		传感器输出阻抗 欧
		电压, 伏	电流, 安	
机械应力(压力、张力、扭力)或位移(振动、移动)	磁性传感器	$10^{-3}-10^{-2}$	$10^{-3}-10^{-5}$	10—1000
	电感传感器	$10^{-3}-10^{-2}$	$10^{-3}-10^{-5}$	10—1000
	压电传感器	$10^{-2}-1$	$10^{-12}-10^{-8}$	10^8-10^{10}
	电容传感器	$10^{-4}-10^{-8}$	$10^{-12}-10^{-8}$	10^7-10^{18}
温度, 可见辐射或红外辐射	热电传感器	$10^{-2}-10^{-4}$	$10^{-6}-10^{-3}$	10—1000
可见辐射(直接的或者作为其他过程, 如机械过程、原子核过程等的函数)	真空光电元件	$10^{-4}-10^2$	$10^{-14}-10^{-3}$	∞
	障层光电元件	$10^{-3}-10^{-1}$	$10^{-6}-10^{-3}$	10—100
	光敏电阻	—	$10^{-2}-10^{-1}$ 安/流明·伏	10^8-10^7
	光电倍增管	$10^{-4}-10^2$	$10^{-7}-10^{-2}$	∞
溶液浓度, 化学反应过程	电化学传感器(极化的电极)	0.1—0.5	$10^{-12}-10^{-10}$	10^9-10^{12}
原子核辐射或X—射线的强度(直接的或作为其他过程的函数)	电离箱	$10^{-3}-10^2$	$10^{-17}-10^{-7}$	∞
生物电流	非极化电极	$10^{-6}-10^{-1}$	$10^{-8}-10^{-3}$	10—1000
电的自动调节设备的电流和电压(电动机转速、稳压器等)	电位器、具有非线性臂的电桥	$10^{-3}-10^{-1}$	$10^{-8}-10^{-4}$	10^2-10^5
气体压力(真空度)	电离传感器	$10^{-2}-1$	$10^{-10}-10^{-4}$	$\approx 10^7$

它们为电荷传感器。第三类传感器通常要求高阻但小电容的负载。

利用适当的阻抗或将要在下章叙述的变换器, 使直流放大器的输入与传感器相匹配。

第二章 直流信号放大的基本問題

1. 电子管直流放大器的特点

大部分电子管直流放大器的第一个特点是阳极电流为栅极电压所控制的輸入級电子管，应该工作于电流放大綫路。显然，直流放大器的輸入端应当包含有某一变换器，其作用是使信号电流在其中能产生足以超过固有噪声和輸入电子管的栅极电路的起伏的电压。这一問題可用本章所討論的几种方法来加以解决。

直流放大器的第二特点是輸入信号具有一定的方向性（极性），亦即信号中存在直流分量。因此直流放大器的各級不能用电容或者变压器来连接，級間的耦合应该是电阻耦合（能将直流信号变为交变信号的直流放大器不属于这种情况）。

直流放大器的第三个特点（更确切地说这是缺点）是輸出端起始的（零点的）电压或电流电平容易发生自发的变化，也就是说在直流放大器中容易发生所谓零点漂移的现象。引起零点漂移的因素以及防止零点漂移发生的措施将在本书第三章中加以討論。

零点漂移使得具有电阻級間耦合的直流放大器不能获得大的放大系数。为了得到大的放大系数，設計出一些直流放大器系統，其輸入直流信号好象是調制在載波（通常是低頻）上，然后用适当的放大器放大。

这样，直流放大器的結構綫路可用下列基本型式表示：

1) 传感器——将直流的信号变为直流电压信号的变换器——輸入級——具有电阻耦合的电压中間放大器——末級

(功率放大器)；

2) 传感器——将直流信号变为交变(或脉冲)电压的变换器——输入级——中间选择性放大器——末级(功率放大器)。

放大器的整体或其某些个别部件可能包含有负反馈。

2. 输入变换器

十分明显, 被测电流流过的电阻可作为最简单的电流——电压变换器。大家知道, 电阻上的电压 $U_R = RI$ 。按照这种又称为直接放大的方法工作的输入装置, 其原理图如图 2 所示。

被测电流 I_x 流过接在直流电子管伏特计的输入端的电阻 R_{BX} (图 2)。测量电压 U_{BX} , 求出信号电流

$$I_x = \frac{U_{\text{BX}}}{R_{\text{BX}}} \quad (1)$$

例如, 如果 $R_{\text{BX}} = 10^{10}$ 欧时, $U_{\text{BX}} = 0.2$ 伏, 则 $I_x = 2 \cdot 10^{-11}$ 安。换接输入电阻, 就很容易改变测量范围。这种方法在测量小电流的电子管测量仪器(微微安计, 或所谓电子管电流计)

中被广泛采用。指示部分可直接标度为被测的量的单位。在自动控制和自动调节设备中, 直流量放大器按照这种方法工作, 能保证当输入信号变化时输出信号的变化是连续的, 且具有相当小的延时。

这种方法的灵敏度主要由于难以制造大于 10^{12} 欧的

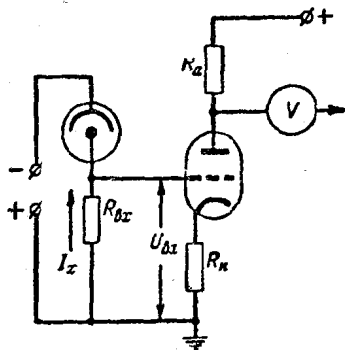


图 2 小电流“直接”测量的原理图

稳定的电阻和在如此高阻的线路中测量微弱电压的稳定度不够而受到限制。按照文献的数据，灵敏度的界限可达到 10^{-14} 安。但是实验指出，当电流在 $0.5 \cdot 10^{-12}$ 安左右和更大一些的时候，信号的稳定放大可以保证。这种方法用于电流的数量级在 10^{-12} — 10^{-6} 安范围的情况下，有其重大的优越性（线路简单和仪器价格不高）。

利用静电计方法测量小电流可以得到非常大的灵敏度，这种方法是以前测定漏电流为基础的。

第一种静电计方法是用被测电流 I_x 改变在电子管栅极电路中的电容 C 的电荷(图 3)。这样，如果知道了电子管的互导 S ，并已测量出电子管的阳极电流变化 ΔI_a ，就可以确定栅极电

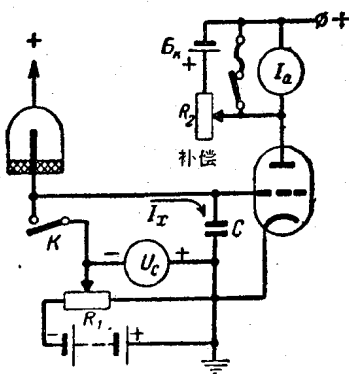


图 3 电子管静电计的原理图

压在这种情况下发生的变化 ΔU_c ：

$$\Delta U_c = \frac{\Delta I_a}{S} \quad (2)$$

电容器电荷的变化不是在瞬时发生的，而是在从断开开关 K 的时刻至读出 ΔI_a 的时刻的时间 t 内发生的。用停表或其他仪器决定时间 t 以后即可求出电流

$$I_x = \frac{\Delta U_c \cdot C}{t} = \frac{\Delta I_a \cdot C}{S t} \quad (3)$$

(在这里和在以后的公式中电流的单位用安，电压的单位用伏，互导的单位用安/伏，电容的单位用法，时间的单位用秒)。

信号电流愈小，则电容器 C 的电容应该愈小，测量 ΔI_a 的

指示仪器也应该愈灵敏。为了准确地测量小的 ΔI_a 值，通常利用补偿阳极电流起始分量的线路（在图 3 中是电池 E_x 和电阻 R_2 ）。

按公式(3)求出的电流 I_x 是信号电流和漏电电流之和。显然，为了得到高的灵敏度，电子管的输入阻抗必须很高。为此，设计了特殊的静电计电子管，它的输入阻抗往往超过 10^{16} 欧。

我们试举一个用这种方法测量小电流的数字例子。

假设电子管互导为 20 微安/伏，设备的输入电容（包括与之连接的传感器的电容）等于 20 微微法，而在 30 秒内测得的阳极电流变化量 $\Delta I_a = 1$ 微安，则

$$I_x = \frac{10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-12}}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 30} \approx 3.3 \cdot 10^{-14} \text{ 安。}$$

这种型式的电子管静电计的灵敏度主要受到栅极电流和阳极电流的自发变化，亦即漂移所限制。一些制造得很精细的仪器，其电子管经过一个个地挑选，这样的仪器可以测量电流到 10^{-17} 安左右。在工厂实验室的情况下，比较简单的电子管静电计能够测量 10^{-15} — 10^{-14} 安左右的电流。这时指示仪器记录的 ΔI_a 值通常在 1 微安左右。因此，电子管静电计的电流放大倍数达到 10^9 （十万万倍）。

第二种静电计方法是不去测量时间 t 而去测量已校准的电容器 C_1 的周期地放电或充电的频率，亦即测量 $f = \frac{1}{t}$ 的数值。图 4 表示这种仪器的简化线路。在电源接通的时刻，电子管的阳极电流使得继电器 P 动作。继电器接点闭合，于是将一个负电压接入电子管的栅极，这个负电压使电容器 C_1 充电，并将电子管封闭，从而使继电器释放。被测电流 I_x 补偿电容器的电荷，而电子管经若干时间后再通电；于是这时继电器再度

动作，电容器再度充电，而电子管则再度被封闭，这样循环下去。假如加在被充电的电容器上的电压等于 U_0 ，而电子管通电和继电器动作时电容器上的电压为 U_0 ，则

$$I_x = C(U_0 - U_0)(f_1 - f_0), \quad (4)$$

这里 f_1 ——有信号 I_x 时的动作频率，

f_0 ——由于电容器和电子管栅极电路漏电而引起的仪器本身的固有动作频率。

动作次数可用任何计数器记录。对于 10^{-8} 安左右和更大的电流可用辉光放电闸流管来代替电子管。

按这种方法工作的仪器，其电容器 C_1 和 f_0 愈小，则灵敏度愈高。

f_0 的数值决定于静电计的输入端的绝缘漏电和电子管的栅流。大家知道，现代的聚苯乙烯和氟塑料（聚四氟乙烯塑料）型的合成绝缘材料可以做成具有 10^{18} 欧左右电阻的绝缘体。因此，这种型式的静电计的灵敏度主要为电子管栅流所限制（更准确地說，是为栅流的起伏所限制）。經驗指出，設計适用于电流小于 10^{-14} 安的仪器会碰到一些严重的困难。

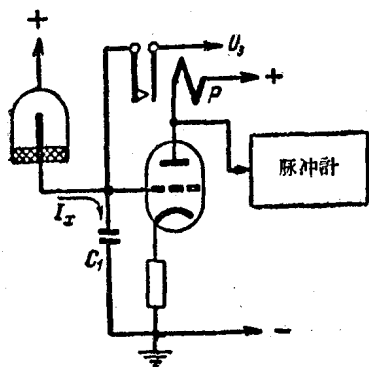


图4 具有计算电容器充电-放电周期的计数器的电子管静电计

上述两种静电计方法的缺点是每次测量要耗费大量的时间，以及不能直接读出电流的数值。因此设计出了一些静电计式直流放大器。这些直流放大器利用无线电电子设备测量电容器充电变化的时间。

这种仪器的线路如图5所示。测量循环从继电器 P_1 的接点断开开始。继电器 P_1 由产生持续时间时间和间隙都经过校准了的脉冲的脉冲发生器使之动作。当 P_1 的接点断开后，信号电流便开始对电容 C_1 充电。经过给定的时间（例如 1 秒），第二

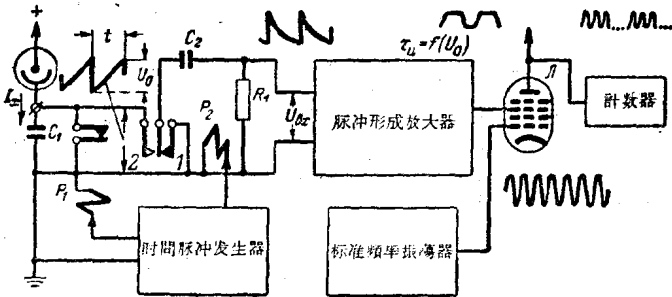


图 5 具有脉冲变换器的电子管静电计

个脉冲使继电器 P_2 的接点由位置 1 移到位置 2（随后继电器 P_1 的接点再度闭合）。电容器 C_1 的电压经过 $C_2 R_1$ 网络而接到放大器的输入端，其形状近似三角形的脉冲。

放大器中含有限幅级。在放大器中信号变成梯形脉冲（即所谓「电压—时间变换」），它的持续时间与信号电流成正比。这个梯形脉冲由放大器的输出端加到瞬时开关级的电子管 J 的栅极。在正常的情况下，瞬时开关级是闭塞的，当这梯形脉冲加到电子管 J 的栅极上时它便被打开，从而将振荡器发出的标准频率（例如 100 赫）的周期脉冲——「标记」加到计数器上。在梯形脉冲终止时，瞬时开关级又重新关闭，计数器记录的「标记」的数目便是电流 I_x 的量度。

上述的循环可以自动地重复，使得我们能够观察到电流的变化。计数器可以直接以电流单位分度。在自动调节系统中，

脉冲—«标记»进入给出控制信号的积分线路。这样就有可能得到大的信号功率放大。

这种型式的静电计仪器虽然复杂，但它的动作速度较快，准确度高（误差小于2%），而且在输入级中能采用一般的接收—放大电子管，这就使得构造复杂这个缺点得到弥补。灵敏度界限决定于电容器 C_1 的绝缘电阻和继电器，以及继电器动作时所引起的寄生脉冲的幅值。现在有一些资料谈到测量 10^{-16} 安数量级的电流，有很好的准确度。

直流信号的直接放大方法和静电计方法很少用于信号源具有小的内阻，和不是电流传感器而是小的电动势传感器的情况。这样的电动势往往仅能引起直流放大器输入电子管的阳极电流不超过自然起伏幅值的微弱变化。但是大家知道，假如信号是周期振荡，那么用无线电技术的方法便可以探测幅值小于无规则噪声幅值的信号。因此，在这种情况下宜于将微弱的«直流»电动势变为周期振荡。

这种变换的最简单的方法是利用机械振动子来周期地隔断信号。被测电流的断续频率通常为 50—400 赫，它经断续后变为矩形振荡，然后进入窄频带放大器的输入端。放大器的输出电压被同步检波器整流。检波器是受使断续器 Π 动作的振荡所控制（图 6）的。这种方法好的地方，就是采用了低频窄带

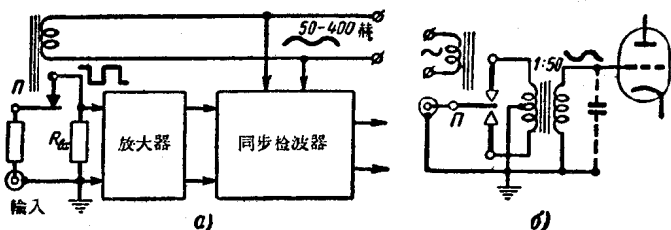


图 6 具有输入振动子变换器的直流放大器
a) 变阻器输入；b) 变压器输入