

为人民服务

毛泽东

毛泽东选集



资料5

晶体管数字电路与数字逻辑

一机部热工仪表科学研究所

一九七〇年三月

最 高 指 示

領導我們事業的核心力量是中國共產黨。

指導我們思想的理論基礎是馬克思列寧主義。

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

工人階級必須領導一切。

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

中國人民有志氣，有能力，一定要在不遠的將來，趕上和超過世界先進水平。

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

在生產鬥爭和科學實驗範圍內，人類總是不斷發展的，自然界也總是不斷發展的，永遠不會停止在一個水平上。因此，人類總得不斷地總結經驗，有所發現，有所發明，有所創造，有所前進。

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

社會的財富是工人、農民和勞動知識分子自己創造的。只要這些人掌握了自己的命運，又有一條馬克思列寧主義的路線，不是回避問題，而是用積極的態度去解決問題，任何人間的困難總是可以解決的。

73.24
123.2

目 录

第一部分 基本电路

第一章 概述	1
§ 1-1 数字电路的特点	1
§ 1-2 “与”门电路	2
§ 1-3 “或”门电路	4
§ 1-4 微分电路	7
§ 1-5 积分电路	10
§ 1-6 元件参数对电路工作性能的影响	11
第二章 反相器	14
§ 2-1 一般概念	14
§ 2-2 导通、截止条件的数学分析	16
§ 2-3 负载分析	18
§ 2-4 几种改进电路	20
§ 2-5 射极跟随器	22
§ 2-6 反相器的设计计算	23
§ 2-7 反相器参考电路	27
第三章 双稳态触发电路	30
§ 3-1 一般概念	30
§ 3-2 集电极——基极耦合触发器	30
§ 3-3 触发器的导通、截止条件	31
§ 3-4 触发方式	32
§ 3-5 触发器的设计计算实例	34
§ 3-6 选通型触发器介绍	37

08863

第四章	单稳态触发电路	4 3
§ 4 - 1	一般概念	4 3
§ 4 - 2	单稳的翻转过程和波形分析	4 3
§ 4 - 3	输出波形的改善	4 6
§ 4 - 4	单稳触发器的设计实例	4 7
§ 4 - 5	单稳触发器实例	4 8

第五章	脉冲发生器	5 0
§ 5 - 1	一般概念	5 0
§ 5 - 2	自激多諧振盪器	5 0
§ 5 - 3	阻塞振盪器	5 4
§ 5 - 4	射极耦合振盪器	5 9

第六章	脉冲波形的选择与变换	6 2
§ 6 - 1	一般概念	6 2
§ 6 - 2	“施密特”电路	6 2
§ 6 - 3	鋸齿波发生器	6 5
§ 6 - 4	显示电路	6 6
§ 6 - 5	光——电转换电路	7 2

第二部分 基本邏輯

第七章	数字邏輯基本概念	7 7
§ 7 - 1	一般概念	7 7
§ 7 - 2	二进制数的表示法	7 7
§ 7 - 3	十进制数与二进制数之間的转换	7 9
§ 7 - 4	数的原碼、补碼、反碼	8 2
§ 7 - 5	邏輯代数的运算法則	8 5

§ 7 - 6	邏輯代數的基本性質	8 6
§ 7 - 7	邏輯代數的應用實例	8 9
第八章	邏輯部件	9 1
§ 8 - 1	一般概念	9 1
§ 8 - 2	數碼寄存器	9 1
§ 8 - 3	移位寄存器	9 2
§ 8 - 4	計數器	9 8
第九章	加法運算部件	10 9
§ 9 - 1	一般概念	10 9
§ 9 - 2	半加器	10 9
§ 9 - 3	一位加法器	11 0
§ 9 - 4	全加器	11 1
§ 9 - 5	累加器	11 4
第十章	電子時鐘介紹	11 9
§ 10-1	一般概念	11 9
§ 10-2	方案的確定	11 9
§ 10-3	原理框圖	12 0
§ 10-4	分頻計數器和譯碼器	12 0
§ 10-5	電路介紹	12 4
編後記		12 6

第一部分 基本电路

第一章 概 述

§ 1-1 数字电路的特点：

近年来，随着电子技术的飞跃发展，数字电路（又称逻辑电路或脉冲电路）越来越得到广泛的应用。尤其在雷达、电视无线电多路通讯、工业自动控制、电子计算机等方面已成为不可缺少的基本单元，从而发展成为一门独立的学科，它包括电路设计和逻辑设计两大部分。

数字电路与放大电路比较有如下特点：

1. 在实际应用中，数字电路设计比较简单，并不象放大电路那样需要一套繁琐数学公式。而且设计的理论数值仅能作为实验时参考，其具体数据必须通过实验来确定，实验是检验理论的唯一标准。

在工程设计中最常用的数学公式有：

(1) 欧姆定理：电阻 = $\frac{\text{电压}}{\text{电流}}$ ， $\langle R = \frac{V}{I} \rangle$

(2) 电压回路方程：总电压 = 分电压之和， $\langle E = \sum_{i=1}^n u_i \rangle$

(3) 节点电流方程：流进电流 = 流出电流 $\langle \sum I_i = \sum I_j \rangle$

2. 数字电路由于只有两个状态，〈导通或截止〉，并且在设计与实验的过程中都考虑了最坏情况，留有一定的余量，所以在更换元件及因元件长时间工作引起参数的变化后，电路仍能满足机器的工作要求。而放大电路往往在更换元件后需要做过细地调试工作，并重新测试指标。所以数字式仪表使用，维护方便。

3. 数字电路逻辑功能强。只需很少的几种基本电路就可以根据需要组合，完成各种逻辑功能，所以说它具有单元组合化的优点。正象利用砖瓦、木材、钢筋、水泥，经过建筑工人的艺朮加工〈或艺朮组合〉就可以建成各式各样的建筑物一样，如最平常的住房到具有世界第一流水平、宏伟而壮丽的人民大会堂都是由一些最基本的单元所组成的。

4. 数字电路所讨论的过程是在非常短暂的时间内发生的现象，

即在百万到千万分之一秒内发生的电的过渡过程。因此着眼点和分析方法也是与放大电路不同的。所以数字电路具有速度快，精度高的优点。

数字电路中最常用的基本电路有“与门”、“或门”、“反相器”、双稳触发器、单稳触发器、脉冲发生器、整形器等，下面就让我们分别来讨论一下。

§ 1-2 “与”门电路 < Y >

与门是一个具有多端输入和单端输出的逻辑电路。其逻辑功能是所有输入信号皆为“1”时，输出信号才为“1”；当输入信号有一个或一个以上为“0”时，输出信号就为“0”。与门可采用电阻、二极管或三极管组成。最常用的是二极管与门。本材料都是以锗管作为例子来说明各种数字电路的性能与逻辑，故定义高信号为“1”，即有输出或是符合电位；地信号为“0”，即无输出或不符合电位。图1-1为二极管与门，其逻辑关系见表1-1，波形图见图1-2。从图1-1与图1-2可看出，当输入端A和B都为地电位时，<“0”信号>二极管 D_A 、 D_B 二端加上了正向电压，使得 D_A 、 D_B 都导通。因在二极管上的压降很小，一般只有0.2~0.5伏，为了讨论逻辑方便，可忽略不计。所以输出端C点为地电位，即输出为“0”信号。当输入端A或B中有一端为地电位，而另一端为低电位时，则对应的二极管导通，另一个二极管截止，使得输出端仍为地电位，即输出为“0”信号。只有当输入端A和B都为低电位时<“1”信号>，在理想情况下，可使得二极管 D_A 、 D_B 都截止，则输出端C点就为低电位—E伏，即输出为“1”信号。所以，此电路能实现与门逻辑，表1-1表示了输入和输出之间的逻辑关系。

R_1 称为与门电阻，其作用一方面可作为二极管的限流电阻，更重要的是取决于其他数字电路的负载能力。电流 I_{R1} 过大时，当在输入端只有一个二极管导通时，很容易使它烧坏。若电流过小时，当在输入端所有二极管导通时，流过任何一个二极管的电流就为

$\frac{I_{R1}}{n}$ (n为输入端数)，有可能使得二极管导通不好，二极管上压

降增加，引起与门输出信号的衰减，这对电路工作是不利的，一般取 $I_{R1} = 1 \sim 10 \text{mA}$ 。为了减少电源种类， $-E$ 一般与整机逻辑电源公用。所以取 $R = \frac{E}{I_{R1}}$ 。其数值一般在 $2 \sim 10 \text{K}$ 之间。

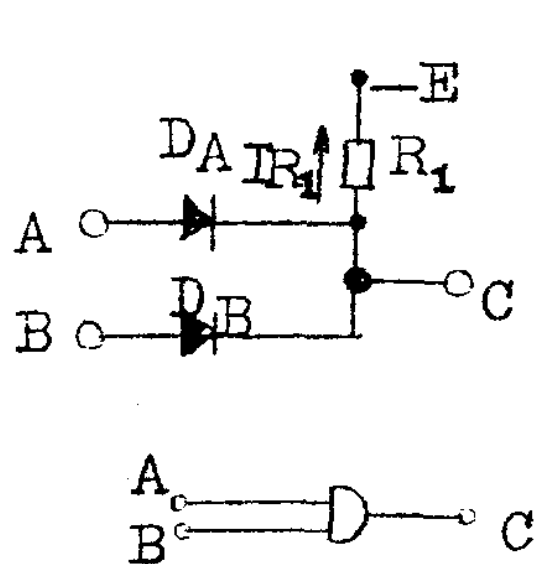


图 1-1 二极管负与门

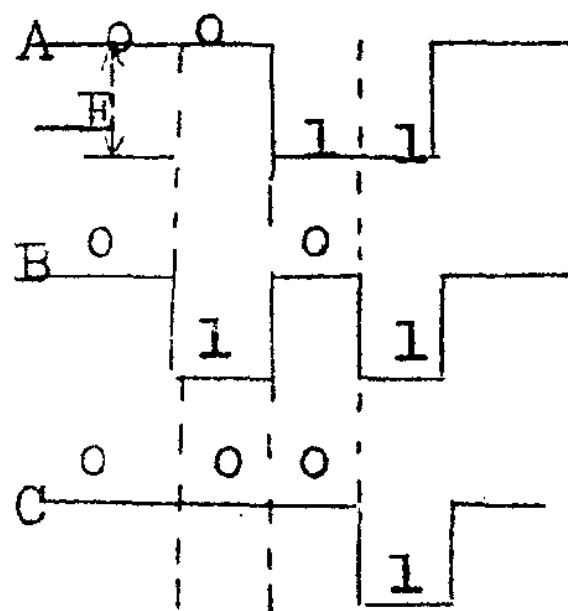


图 1-2 波形图

输入	A	0 0 1 1
	B	0 1 0 1
输出	C	0 0 0 1

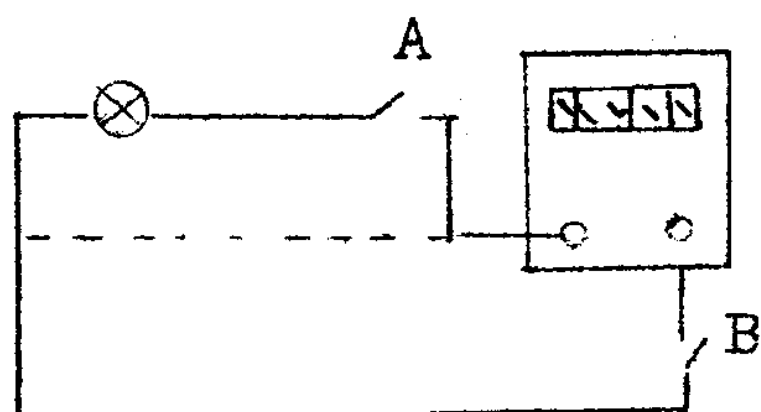
表 1-1 与门逻辑关系表

从表 1-1 中看出，“与”门在逻辑上实现逻辑乘运算，即：
 $C = A \cdot B$ 。

从表 1-1 或图 1-2 都可以看出，对“0”信号言，此电路为正“或”门即 $\overline{C} = \overline{A} + \overline{B}$ 。所以说在逻辑关系上负与门和正或门等价，因此可推导出：

$$\overline{C} = \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B} \quad \dots\dots\dots \langle 1-1 \rangle$$

这种“与”作用在日常生活中也是经常遇到的，例如，火表的总开关与电灯开关的关系就类似乎“与”的关系，从图可知要火表走动，除了电灯开关合上以外，还需要火表总开关合上，若有一个开关不合上，那么火表就不会走动，因此这里“与”的意义是火表总开关与电灯开关都合上时，火表才走动。



§ 1—3 “或”門电路 < H >

或門也是一个具有多端输入和单端输出的邏輯电路，其邏輯功能是在当输入信号有一个或一个以上为“1”时，输出信号为“1”，只有当所有输入信号为“0”时，输出信号才为“0”。或門也可采用电阻，二极管或三极管组成，最常用的是二极管或門。图 1—3 为二极管負或門。其邏輯关系見表 1—2，波形图見图 1—4。

输入	A	0	0	1	1
	B	0	1	0	1
输出	C	0	1	1	1

表 1—2
或門邏輯关系表

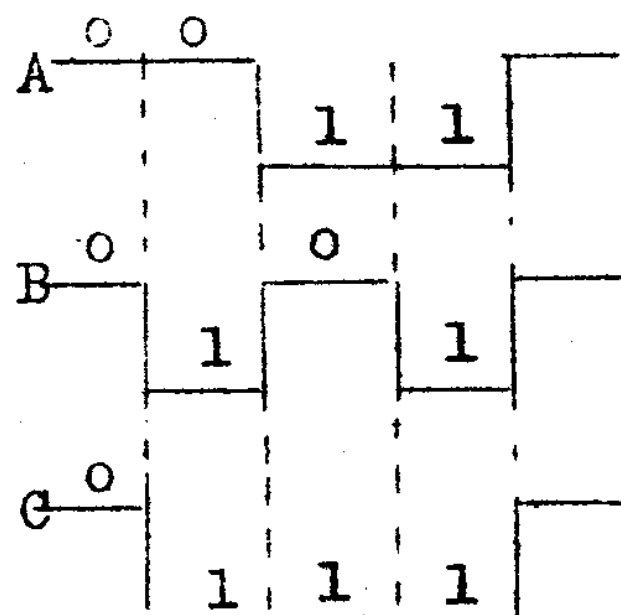
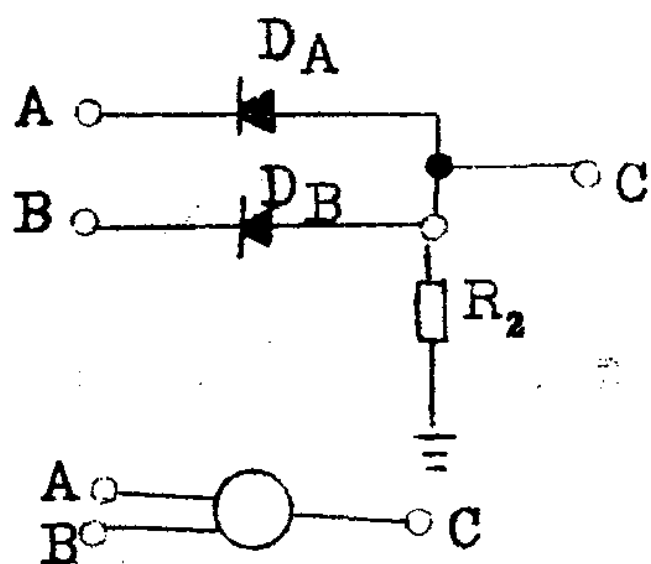


图 1—3 二极管負或門

图 1—4 波形图

从图 1—3 与图 1—4 可看出，当输入端 A、B 都为地电位时，<“0”信号>二极管 D_A 、 D_B 都截止，则输出端 C 也为地电位，即输出为“0”信号，当输入端 A 或 B 中有一端为地电位，而另一端为低电位时，对应的二极管截止，而另一个二极管导通，则输出端 C 为低电位，即输出为“1”信号。当输入端 A 和 B 都为低电位时<“1”信号>，二极管 D_A 、 D_B 都导通，则输出端 C 为低电位，即输出为“1”信号。所以此电路能实现負或門邏輯。表 1—2 表示了输入与输出之间的邏輯关系。

R_2 称为或门电阻。在实际运用中“或”门后面往往就是反相器或双稳态触发器。因此这时 R_2 已成为反相器或双稳态触发器的一部分，其数据可由反相器或双稳态触发器计算出。 R_2 的大小直接影响前一级电路的负载能力大小。

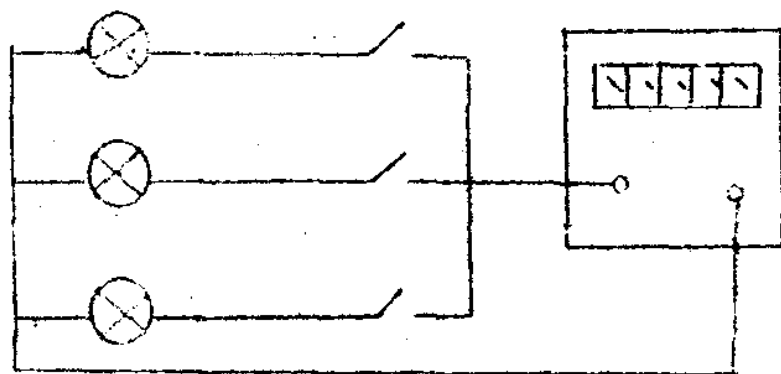
从表 1—2 中看出，“或”门在逻辑上实现逻辑加运算，即 $C = A + B$ 。

从表 1—2 或图 1—4 都可看出，对“0”信号言，此电路为正与门即 $\overline{C} = \overline{A} \cdot \overline{B}$ ，所以说在逻辑关系上，负或门和正与门等价，

因此可推导出： $\overline{C} = \overline{A} \cdot \overline{B} = \overline{A + B}$ (1—2)

公式 < 1—1 >，< 1—2 > 在利用逻辑代数简化逻辑电路中很有用。在有些情况下，图 1—3 中 R_2 一端不接地，而是接正电源 E ，这时 R_2 一般可取 2—10K Ω 。

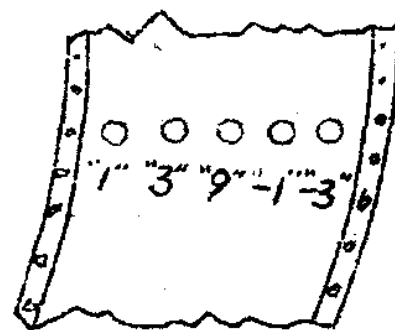
这种“或”作用在日常生活中也是经常可以碰到的，例火表的走动（电流流过火表）与电灯开关的关系就类似于“或”的关系，如图，一只火表并联了许多电灯开关，当有一个开关合上时（即电灯打开），火表就通过电流而走动。而只有所有开关都不合上时（即没有一个电灯亮时），火表才不走动。



“与”门和“或”门在整机逻辑中主要起控制和传递信号作用。

下面举一个由上海东方红服装五厂工人老师傅创制的某电子装置中所采用的二进制与十进制及十进制与三进制的互换实例来说明“与”门和“或”门的用途。

在右图的胶卷带上有五只孔，分别表示 1、3、9，—1，—3 数碼。



(1) 如何把四位数码寄存器中的二进制数转换成十进制数。

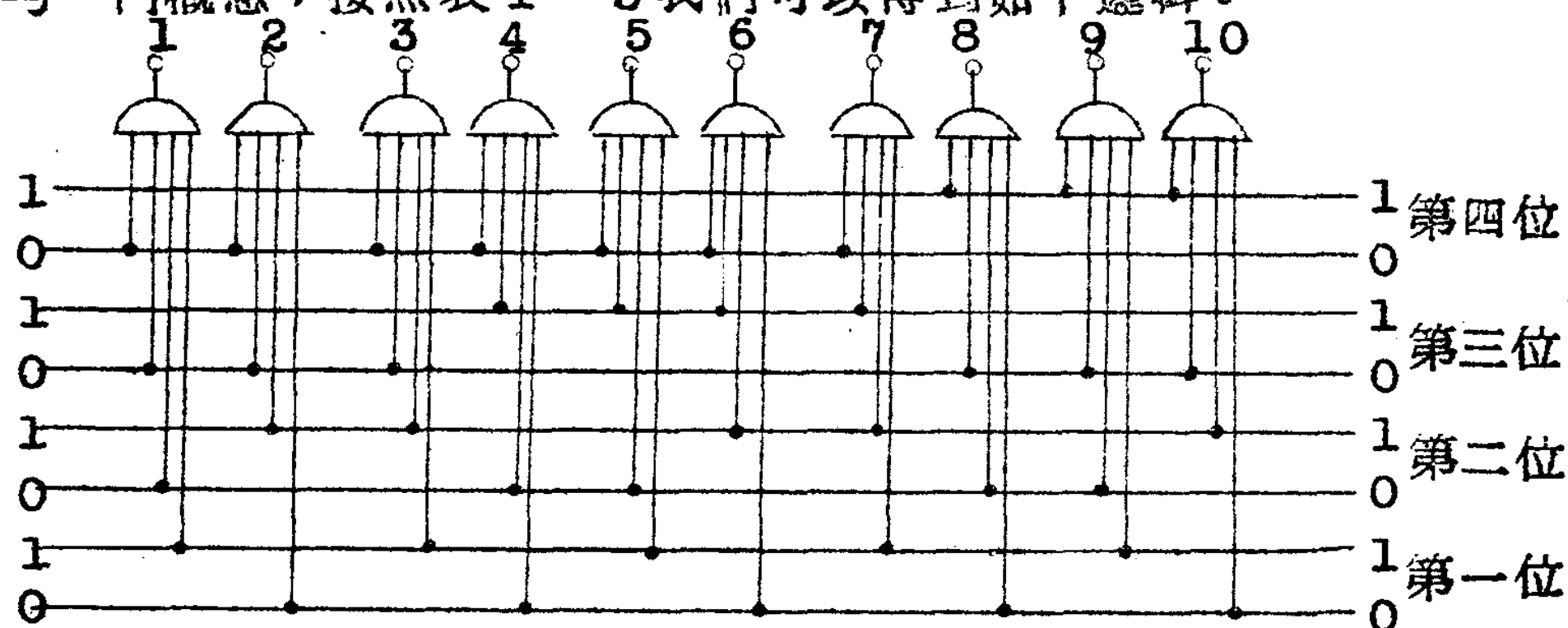
(2) 如何把十进制数 1、2……10 穿成三进制数码孔。

首先讓我們來討論第一個問題，即二——十轉換。十進制數碼與二進制數碼關係見表 1—3。

十進制	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
二進制	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010

表 1—3

從表 1—3 可看出，十進制數“5”表示只有當二進制數碼 0101 同時存在時，才能得到，這是一個“與”門概念。所以利用“與”門概念，按照表 1—3 我們可以得到如下邏輯。



從以上邏輯圖還可看出，當把組成各個“與”門的二极管及電阻有規則的排列時，即就是我們經常碰到的“譯碼器”了，所以說譯碼器的實質問題就是“與門”概念。

再讓我們來討論第二個問題，即把十進制轉化為三進制。十進制與三進制之間的關係見表 1—4。

十進制	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
三進制	1	3-1	3	1+3	9-1-3	9-3	9+1-3	9-1	9	9+1

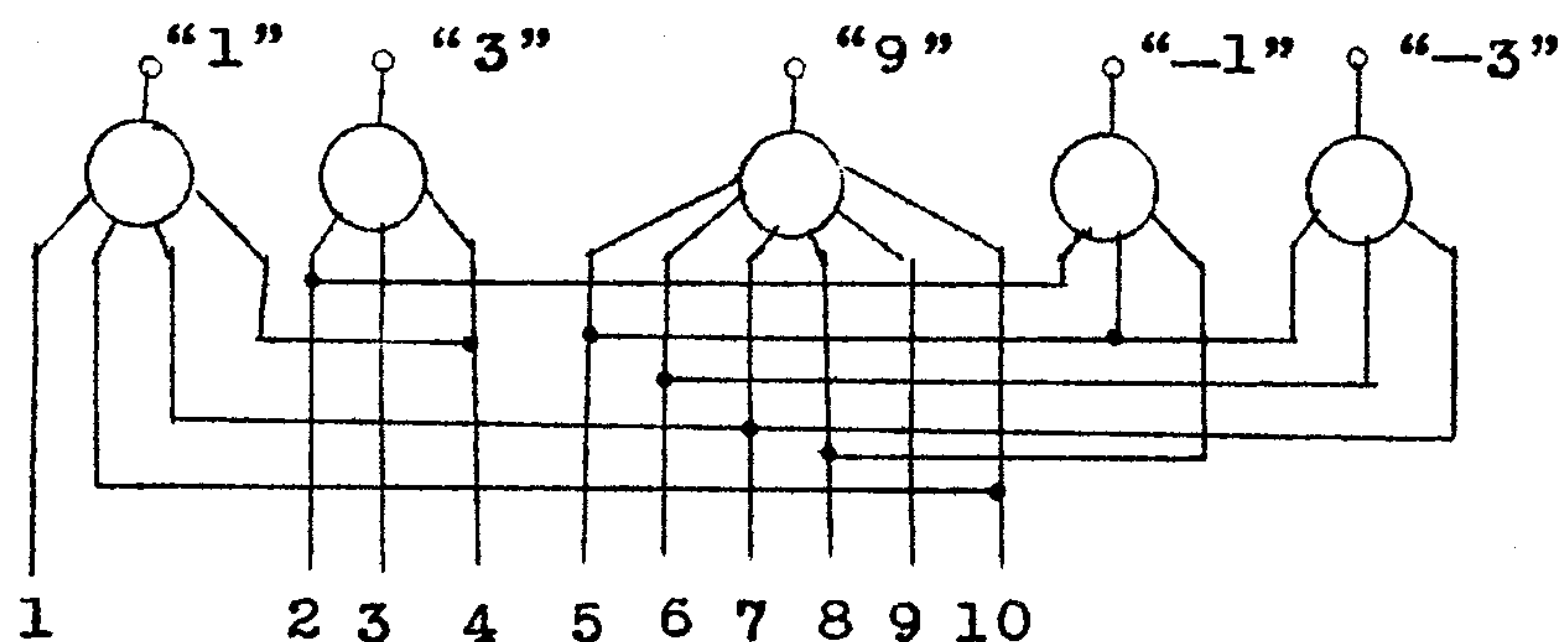
表 1—4

從表 1—4 中可看出，十進制數 1, 4, 7, 10 都包含有三進制數“1”，即對十進制數 1, 4, 7, 10 來講，都得在三進制數“1”的地方打孔，這是一個“或”門概念。同理，2, 3, 4 包含有“3”；5, 6, 7, 8, 9, 10 包含有“9”；2, 5, 8 包含有“-1”；5, 6, 7 包含有“-3”。整理後見表 1—5

三進制數	1	3	9	-1	-3
十進制數	1, 4, 7, 10	2, 3, 4	5, 6, 7, 8, 9, 10	2, 5, 8	5, 6, 7

表 1—5

他們分別都为“或”門概念，所以根据以上分析，可得到如下邏輯。



§ 1—4 微分电路：

这种电路的输出信号与输入信号的微分成正比例。常用来产生尖頂脈冲或完成微分运算。其物理过程是电容或电感元件的充放电过程。下面举由电容 C 与 R 组成的电路来分析。见图 1—5

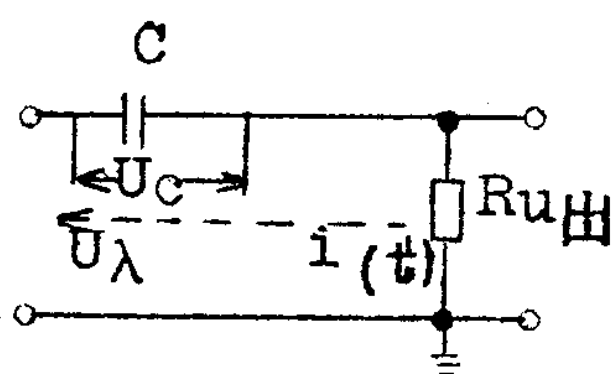


图 1—5 微分电路

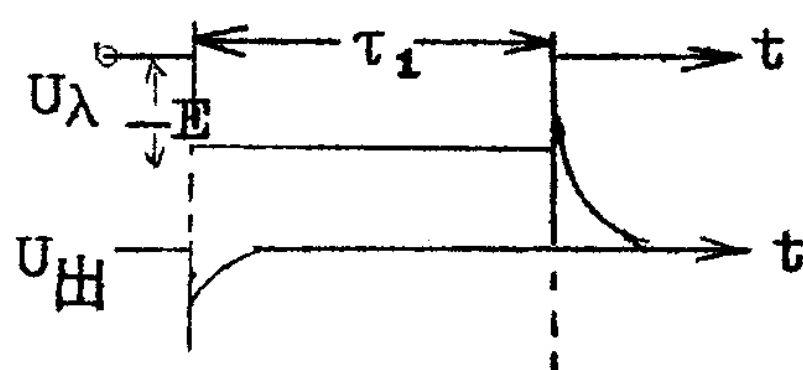


图 1—6 波形图

从电工原理中我們知道电容器可通过交流电，且频率越高，阻抗越小。而对直流而言，电容器可认为是断开的，所以当 U_{λ} 从 0 电位突然跳到 $-E$ 伏时，在这跳变的一瞬间，可以认为变化速度相当剧烈，即频率非常高，这时电容器可看成为被短路，因此输出电压近視的等于输入电压的幅值。在输入电压突变后的平頂部分可看成为暂时直流，在这种情况下，电容器又可认为是断路，因此输出电压就要很快回到 0 电位，所以产生一个負尖頂脈冲。同理，在当输入电压从 $-E$ 伏突然跳到 0 电位时，输出又产生一个正尖頂脈冲。

当输入端突然加上一 E 伏电压时，就有电流 $i(t)$ 经过 R 向 C 充电，並使 C 上很快充滿电荷，当输入端电压由 $-E$ 伏突然跳到 0

伏时，电容器上已充满的电荷又经过 R 放电，並很快放完。所以在输入端加上方波电压时，输出端就会得到負正尖頂脈冲，见图 1-6。

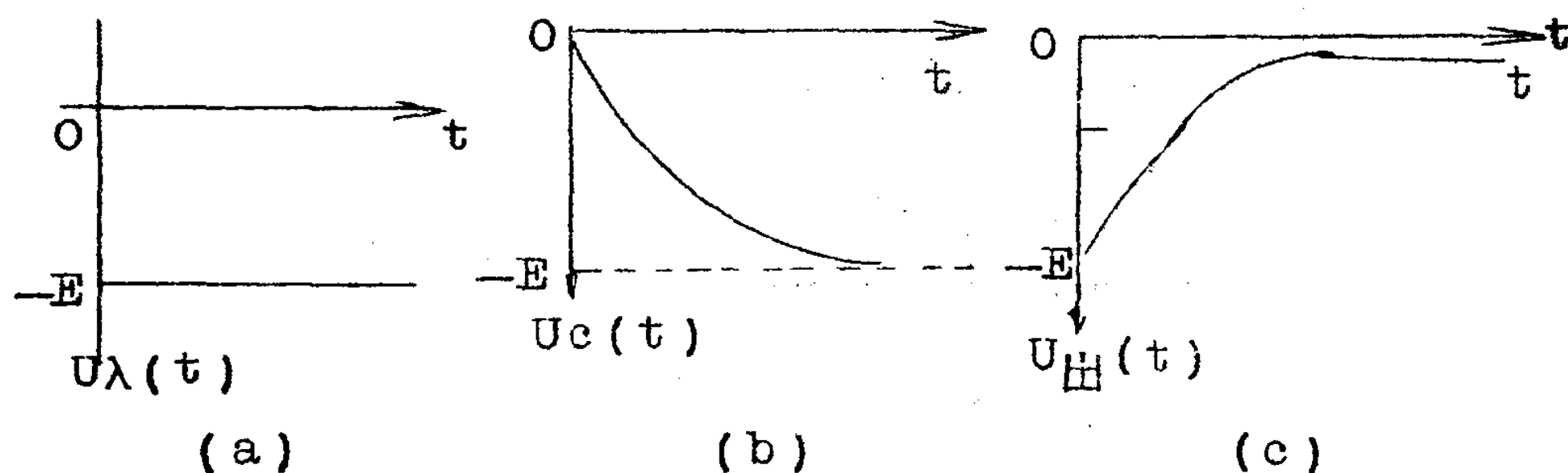


图 1-7 各点波形图

下面讓我們从数学上来具体分析一下图 1-5 微分电路的充电放电过程。假设 U_{λ} 为阶跃信号 $U(t)$ ，见图 1-7(a)。

由物理概念可知，电容器的电容物理意义是在单位电压下所能儲积电荷的能力，即 $C = \frac{Q}{V}$ 。当流过电路的电荷是变化量时，在 0 到

t 时刻內，电荷的累积数为 $Q = \int_0^t i(t) dt$ ，对电容器来讲，所以 $Q = CU(t)$

$$= \int_0^t i(t) dt。$$

$U(t)$ 为加在电容器两端电压的变化量。

两边取微分后得：

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}；$$

按图 1-5，流过电容器 C 的电流应等于流过电阻 R 的电流。

所以

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} = \frac{u_{\lambda}(t) - u_c(t)}{R}；化简后得：$$

$$R C \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t) = U\lambda(t) \dots\dots\dots (1-3)$$

可以看出这是一个一阶微分方程。

在原始状态时，电容器上无电荷，所以

$$\text{初始条件} (t=0 \text{ 时}) U_c(0) = 0$$

电容器上最终要充满电荷，所以

$$\text{终值条件} (t \rightarrow \infty \text{ 时}) U_c(\infty) = -E$$

在具有外加电压情况下，一阶微分方程的解为

$$U_c(t) = A e^{-\frac{t}{RC}} + B \dots\dots\dots (1-4)$$

把终值条件代入公式 < 1-4 > 得 $B = -E = U_c(\infty)$

把初值条件代入公式 < 1-4 > 得 $A = E = U_c(0) - U_c(\infty)$

再把解 $U_c(t) = E e^{-\frac{t}{RC}} - E$ 代入公式 < 1-3 > 得：

$$RC \times \left(-\frac{E}{RC}\right) e^{-\frac{t}{RC}} + E e^{-\frac{t}{RC}} - E = -E \text{ 满足方程要求。}$$

$$\therefore \text{电容器上电压的变化规律为 } U_c(t) = -E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \dots\dots\dots (1-5)$$

因此输出电压的变化规律为 $U_{\text{出}}(t) = U\lambda(t) - U_c(t)$

$$= -E e^{-\frac{t}{RC}} \dots\dots\dots (1-6)$$

$U_c(t)$, $U_{\text{出}}(t)$ 波形见图 1-7 (b)、(c)。

公式 < 1-5 > 的物理解释：当输入端突然加负突变电压时，

电流 $i(t)$ 通过 R 向 C 充电，并且以速率为 $\frac{1}{RC}$ 按指数上升，最后

充满电荷。电容器上最终电压为 $-E$ 。当 $t=RC$ 时

$$u_c(t) = -E(1 - e^{-1}) = -E(1 - \frac{1}{e}) = 63\% (-E), \text{ 定义 } \tau = RC$$

叫做电路的时间常数。其物理解释为在阶跃电压作用下，从初始

点上升到最终电压值的 63 % 所需要的时间。时间常数这一概念在分析和理解数字电路时经常用到。

对微分电路来讲，必须要求 $\tau = RC \ll \tau_1$ (τ_1 为脉冲宽度。) 实际上电容器有一定的漏电流，即对电流言，存在一漏阻抗 Z_c 与 R 起分压作用，所以微分信号输出幅度要比输入幅度小。在调试线路中，出现因尖脉冲幅度太小，触发灵敏度不够时，可适当增加 R 。当尖脉冲能量太小，即尖脉冲宽度太小时，可适当增加 C ，但必须满足 $RC \ll \tau_1$ 。这在调试单稳，双稳触发器等线路时很有用途。

微分电路还可以用电阻、电感组成，见图 1-8

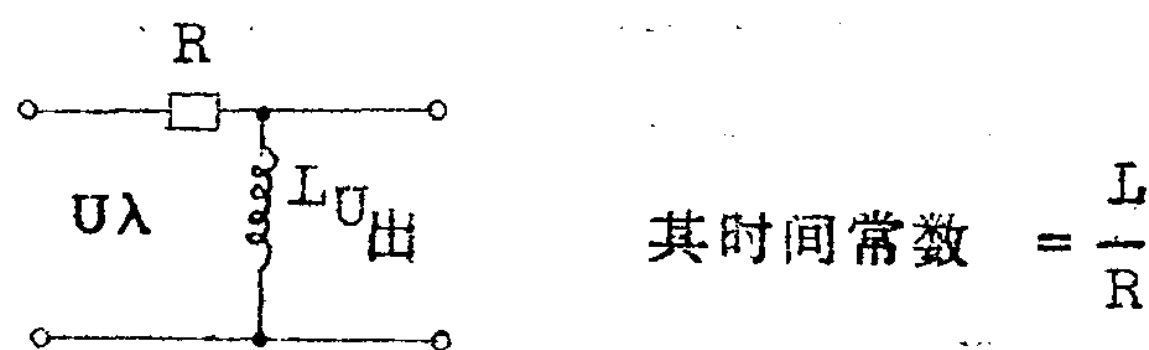


图 1-8

微分电路在一般无线电设备和自动控制系统中常用作超前网络反馈和超前校正。

§ 1-5 积分电路

这种电路的输出信号与输入信号的积分成正比例。常用来产生线性变化电压（如锯齿波，三角波等）或完成积分运算。其物理过程也是电容、电感元件的充放电过程。电路见图 1-9(a)(b)。

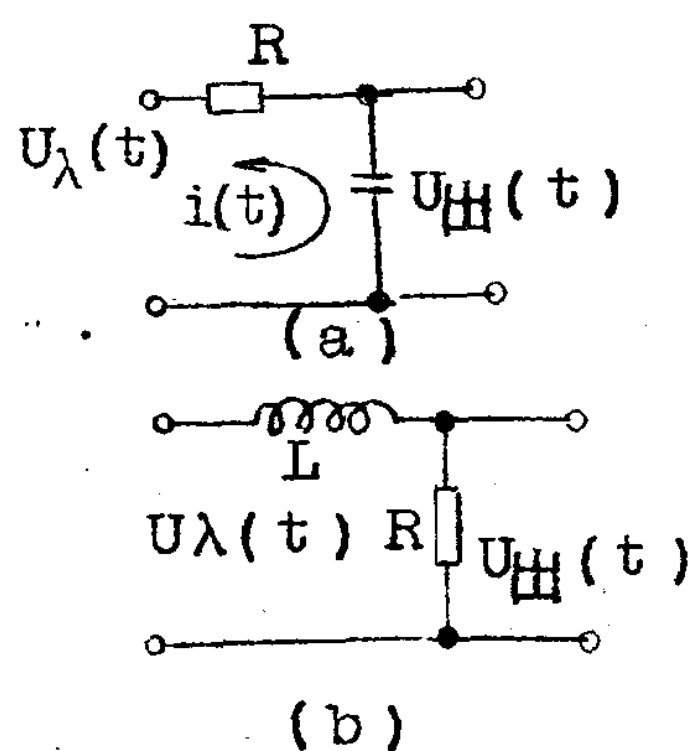


图 1-9 积分电路

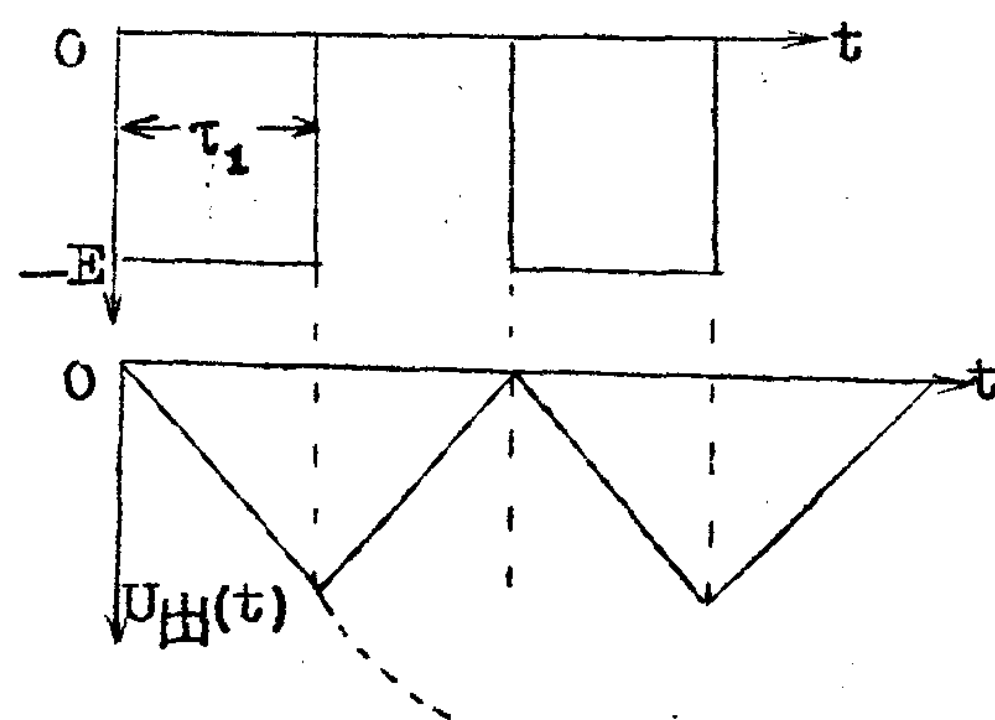


图 1-10 波形图

按图 1-9(a) 列出微分方程：

$$C \frac{du_{\text{出}}(t)}{dt} = \frac{U_{\lambda}(t) - U_{\text{出}}(t)}{R}$$

$$C \frac{du_{\text{出}}(t)}{dt} + U_{\text{出}}(t) = U_{\lambda}(t) \quad \dots\dots\dots (1-7)$$

这方程的形式与公式 < 1-3 > 完全相同，不过用 $U_{\text{出}}(t)$ 代替 $U_c(t)$ 就是了。

设 $U_{\lambda}(t)$ 为阶跃电压，可解出输出电压的变化规律。

$$U_{\text{出}}(t) = -E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \dots\dots\dots (1-8)$$

$$U_c(t) = -E e^{-\frac{t}{RC}} \quad \dots\dots\dots (1-9)$$

波形图见图 1-11

$\tau = RC$ 仍是此积分电路的时间常数。

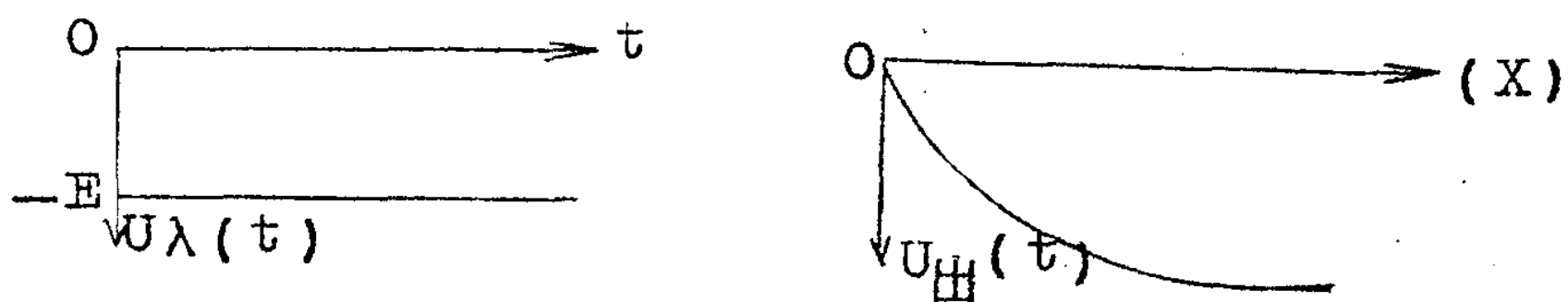


图 1-11 波形图

在实际应用中，为了保证上升电压的线性更好，通常取时间常数 $\tau = RC \gg \tau_1$ ， τ_1 为脉冲宽度。

图 1-10 为在方波电压作用下，输入、输出电压波形。

§ 1-6 元件参数对电路工作性能的影响。

在分析电子线路时，元件参数的数量级概念很重要。同一形式的线路，在取不同的数值时，就会起到不同作用。所以说分析电子线路，不能单看其形式，必须结合具体数值及在整机中的作用和要求来综合分析，从而抓住实质。“我们看事情必须要看它的实质，而把它的现象只看作入门的向导，一进了门就要抓住它的实质，这才是可靠的科学的分析方法。”“胸中有‘数’。就是说，对情况和问题一定注意到它们的数量方面，要有基本的数量的分析。任

何质量都表现为一定的数量，没有数量也就没有质量。”我们伟大领袖毛主席的就一光辉教导是我们在分析电路时的唯一指导思想，按毛主席的话去做，就能从错综复杂的线路中抓住实质，从而解决关键问题。

下面让我们举微分电路参数数值来看其对电路工作性能的影响。

图 1-12 的输入端加上连续负方波电压，图 1-13(a)

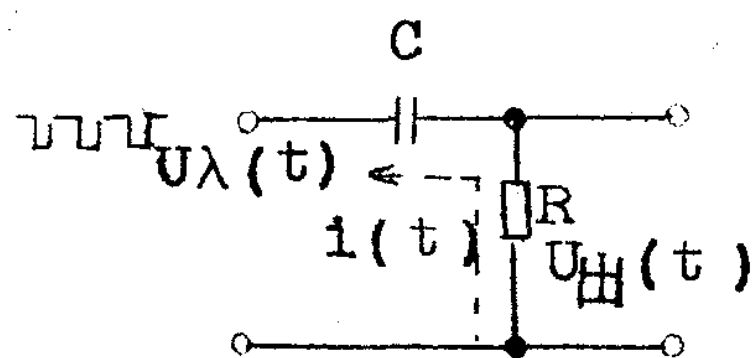


图 1-12 微分电路

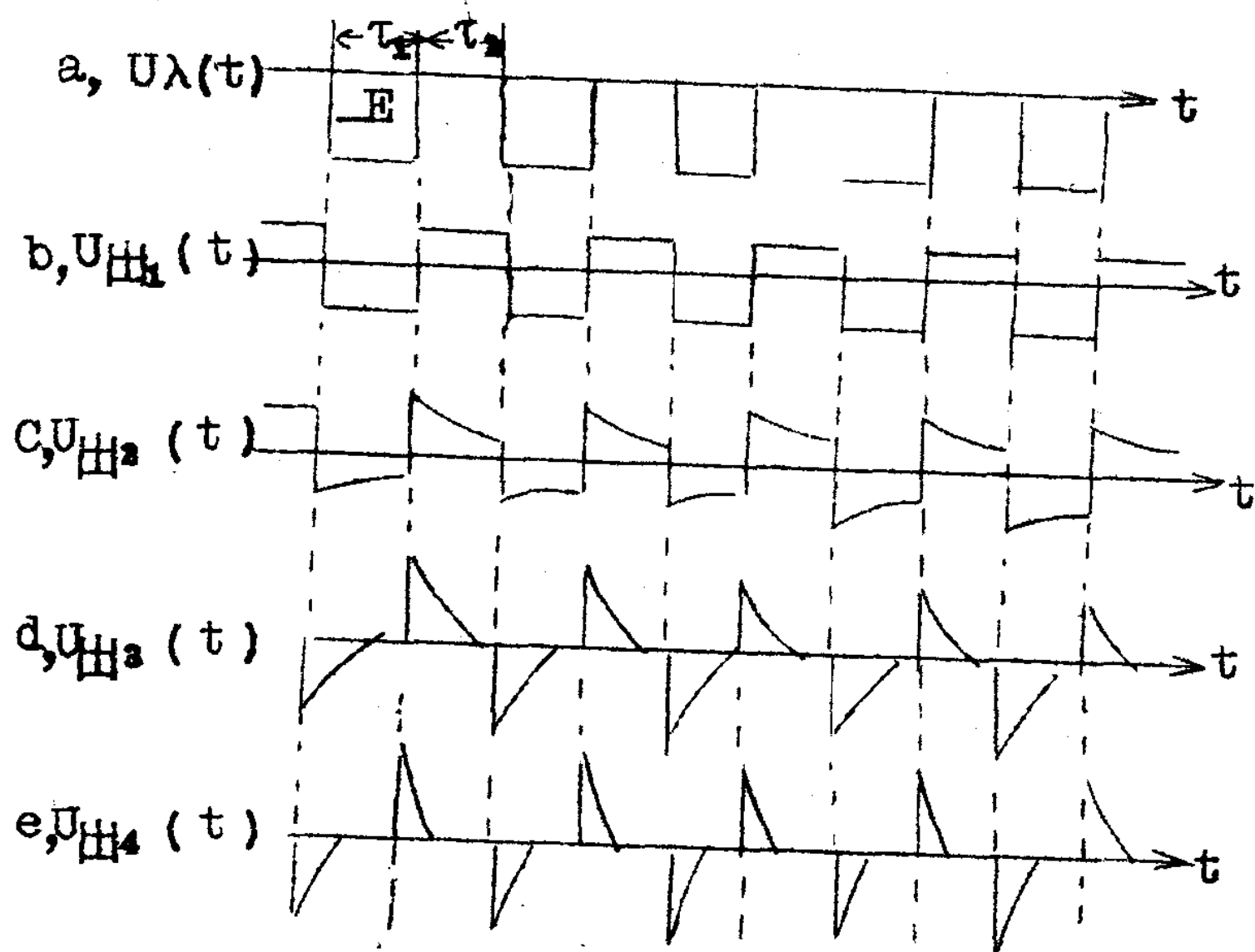


图 1-13 输出波形图

$U_{\lambda}(t)$ 负跳变时，电流 $i(t)$ 向电容 C 充电，

$$\therefore U_{出} = -E e^{-\frac{t}{RC}}$$

$U_{\lambda}(t)$ 正跳变时，电容上电荷向 R 放电，