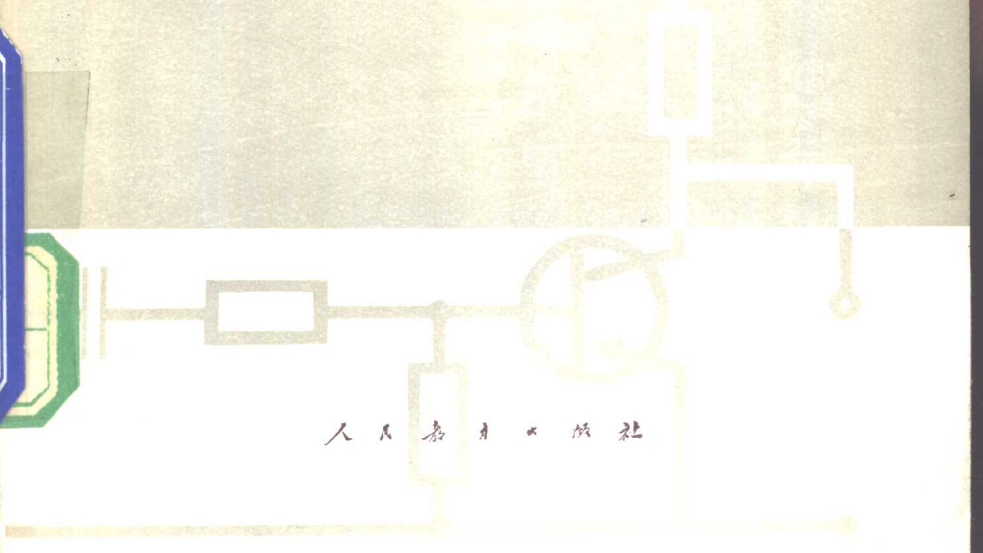


# 无线电工程设备中脉冲与数字 电路单元电路的计算

华中工学院无线电技术教研室

曾维诚、陈耀奎、谢瑞和译

A decorative circuit diagram is overlaid on the bottom half of the cover. It features a green rectangular component on the left, connected by lines to various other components including a square, a circle, and a triangle, all rendered in a light yellow or gold color.

人民教育出版社

# 无线电工程设备中脉冲与数字 电路单元电路的计算

华中工学院无线电技术教研室  
曾维诚、陈耀奎、谢瑞和译

人 民 邮 电 出 版 社

## 内 容 提 要

本书系根据苏联“高等教育”出版社 (Высшая школа) 1976 年出版的 Ю. М. 卡扎里诺夫 (Ю. М. Казаринов) 等人所著“无线电工程设备中脉冲与数字电路单元电路的计算” (Расчёт элементов импульсных и цифровых схем радиотехнических устройств) 译出的。原书经苏联高等教育部批准为高等工科院校无线电系高年级学生的教学参考书。

本书介绍了无线电工程系统中各种脉冲数字电路的计算方法; 阐述了建立在离散时序系统理论基础上的各种数字电路的逻辑设计; 列举了几种脉冲与数字设备的设计实例。

本书可供无线电专业的师生和已经具备脉冲技术基本知识的工程技术人员参考。

本书系由华中工学院无线电技术教研室曾维诚、陈耀奎、谢瑞和三同志翻译。熊兆飞等同志曾对部分译稿提出许多宝贵意见。

## 无线电工程设备中脉冲与数字 电路单元电路的计算

华中工学院无线电技术教研室  
曾维诚、陈耀奎、谢瑞和译

\*

人民教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
长春新华印刷厂印装

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  印张 13.625 字数 327,000  
1979 年 2 月第 1 版 1979 年 9 月第 1 次印刷  
印数 1—20,000  
书号 15012·0147 定价 1.10 元

## 序 言

本教学参考书适用于脉冲和数字设备的设计，这种设备已广泛应用在各种无线电工程系统中。因为在现代的脉冲数字设备中，很少用到电子管，所以本书阐述的方法和电路计算举例只限于晶体管和集成电路设备的设计。由于脉冲电路和数字电路的计算方法不同，本书分为两部分。在第一篇的六章中，研究最常用脉冲电路的计算方法。作者设想：读者已经熟悉电路的理论和工作原理，因而书中对这些电路没有作详细的介绍，对计算公式也未作推导。必要时，可从本书所列的参考资料中找到这方面的知识。

数字设备是根据离散时序系统的理论设计的，这一理论在参考资料中已经作了充分的论述。但是，工程上的分析和综合方法对于离散时序系统的逻辑设计仍然是必要的。随着具有完成固定运算功能的集成电路的出现，逻辑设计的工程方法显得特别重要。因此本书的第二篇首先对集成电路进行分类，并引出集成电路的主要电气参数。接着介绍组合电路和带有记忆的离散时序系统（电位控制型异步时序系统和同步时序系统）的综合方法。根据时序系统框图综合的结果，讨论了从文字叙述功能到画出原理图并选择集成电路主体的一系列电路的设计。

最后，研究了自动化无线电系统数字设备的几个实例。

各章内容基本上是根据功能原理和计算方法的通用性来安排的。所用的方法简单并保证有足够准确的运算，而且一般都与无线电工程中运用的方法相符。但是，某些电路的计算方法系重新拟订或作了重大修改，以便与具体工程中的结果相一致。

本书的对象是无线电系高年级学生，以及已掌握脉冲和计算技术的工程师和技术人员。

本书的第一章系Ю. М. 卡扎里诺夫所写, 第二章和第七章——B. М. 瓦西里耶夫, 第三章和第十章——Ю. П. 格里申, 第四章和第五章——Р. В. 马尔木卓夫, 第六章——В. С. 托尔斯恰可夫, 第八章、第九章以及第十一章的第六节——Г. И. 布哈里斯基, 第十一章的其余各节——В. Д. 朱宾科。全书由 Ю. М. 卡扎里诺夫校阅。

作者对 B. Т. 伏罗金教授、А. М. 邦奇-勃鲁耶维奇和 Г. А. 达尼罗维奇两位讲师表示深切感谢, 他们曾对本书原稿作了认真的审阅。

作 者

# 目 录

|          |   |
|----------|---|
| 序言 ..... | 1 |
|----------|---|

## 第一篇 晶体管脉冲设备单元电路的计算

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第一章 脉冲变换电路的计算 .....             | 1   |
| § 1.1 半导体二极管和晶体管的开关特性 .....     | 1   |
| § 1.2 限幅器 .....                 | 13  |
| § 1.3 二极管比较电路·箝位电路·时间选择电路 ..... | 30  |
| § 1.4 微分和积分电路 .....             | 40  |
| § 1.5 冲击激励振荡器的计算 .....          | 48  |
| 第二章 矩形脉冲发生器的计算 .....            | 54  |
| § 2.1 集-基耦合自激多谐振荡器 .....        | 54  |
| § 2.2 自激多谐振荡器的变形电路 .....        | 60  |
| § 2.3 自激多谐振荡器的计算程序 .....        | 64  |
| § 2.4 集-基耦合单稳多谐振荡器 .....        | 68  |
| § 2.5 射极耦合单稳多谐振荡器 .....         | 73  |
| § 2.6 自激间歇振荡器 .....             | 79  |
| § 2.7 他激间歇振荡器 .....             | 87  |
| § 2.8 间歇振荡器电路的计算程序 .....        | 89  |
| 第三章 张弛振荡器的同步和脉冲的分频 .....        | 95  |
| § 3.1 脉冲分频器的简要特性及其分类 .....      | 95  |
| § 3.2 自激张弛振荡器的同步 .....          | 96  |
| § 3.3 由他激张弛振荡器组成的分频器 .....      | 105 |
| § 3.4 复杂的分频器电路 .....            | 107 |
| 第四章 触发器的计算 .....                | 110 |
| § 4.1 对称触发器的静态工作状态 .....        | 110 |
| § 4.2 对称触发器的触发方式和速度 .....       | 114 |
| § 4.3 对称触发器的变形电路 .....          | 124 |
| § 4.4 射极耦合不对称触发器 .....          | 127 |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| § 4.5      | 触发器电路计算举例 .....          | 131        |
| <b>第五章</b> | <b>线性电压发生器的计算 .....</b>  | <b>139</b> |
| § 5.1      | 线性电压发生器的特性参数 .....       | 139        |
| § 5.2      | 电容充电式线性电压发生器 .....       | 140        |
| § 5.3      | 电压正反馈线性电压发生器 .....       | 146        |
| § 5.4      | 电容负反馈线性电压发生器 .....       | 156        |
| <b>第六章</b> | <b>线性电流发生器的计算 .....</b>  | <b>162</b> |
| § 6.1      | 磁偏转的特点和线性电流发生器的方框图 ..... | 162        |
| § 6.2      | 偏转线圈特性参数的计算 .....        | 164        |
| § 6.3      | 线性电流发生器电路的选择和计算公式 .....  | 170        |
| § 6.4      | 线性电流发生器的计算方法 .....       | 182        |

## 第二篇 集成电路数字设备的单元设计

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| <b>第七章</b> | <b>逻辑集成电路系统 .....</b>      | <b>191</b> |
| § 7.1      | 电路的分类 .....                | 191        |
| § 7.2      | 外部特性和电气参数 .....            | 192        |
| § 7.3      | 直接耦合和电阻耦合的晶体管逻辑电路 .....    | 200        |
| § 7.4      | 二极管-晶体管逻辑电路 .....          | 204        |
| § 7.5      | 晶体管-晶体管逻辑电路 .....          | 208        |
| § 7.6      | 射极耦合逻辑电路 .....             | 209        |
| § 7.7      | 直接耦合 MOS 型场效应晶体管逻辑电路 ..... | 211        |
| <b>第八章</b> | <b>组合电路的综合 .....</b>       | <b>217</b> |
| § 8.1      | 引言 .....                   | 217        |
| § 8.2      | 逻辑代数的基本公理、定理和恒等式 .....     | 217        |
| § 8.3      | 开关函数 .....                 | 221        |
| § 8.4      | 开关函数的最小化 .....             | 230        |
| § 8.5      | 逻辑方程组的解法 .....             | 244        |
| § 8.6      | 逻辑元件和逻辑电路的模型 .....         | 251        |
| § 8.7      | 逻辑电路的分析 .....              | 258        |
| § 8.8      | 无竞争组合电路的综合 .....           | 267        |
| § 8.9      | 电位信号和脉冲信号 .....            | 273        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第九章 时序电路的综合</b> .....           | 278 |
| § 9.1 引言 .....                     | 278 |
| § 9.2 时序电路的模型 .....                | 279 |
| § 9.3 电位控制型异步时序系统 .....            | 282 |
| § 9.4 电位控制型异步触发器和记忆元件 .....        | 288 |
| § 9.5 电位控制型异步时序系统的框图综合 .....       | 295 |
| § 9.6 电位控制型异步时序系统的抽象综合 .....       | 303 |
| § 9.7 电位控制型异步时序系统综合的举例 .....       | 325 |
| § 9.8 同步时序系统 .....                 | 334 |
| § 9.9 同步记忆元件 .....                 | 342 |
| § 9.10 同步时序系统的框图综合 .....           | 356 |
| <b>第十章 数字电路的逻辑设计</b> .....         | 362 |
| § 10.1 引言 .....                    | 362 |
| § 10.2 寄存器 .....                   | 362 |
| § 10.3 脉冲计数器 .....                 | 364 |
| § 10.4 译码器 .....                   | 379 |
| <b>第十一章 数字化自动控制系统的几种典型设备</b> ..... | 381 |
| § 11.1 数字式时间间隔测量器的工作原理、设计和计算 ..... | 381 |
| § 11.2 数字式定时器 .....                | 395 |
| § 11.3 数字式频率计 .....                | 399 |
| § 11.4 可控脉冲离散延迟电路 .....            | 401 |
| § 11.5 十进制读数显示系统的设计 .....          | 409 |
| § 11.6 数字设备的逻辑设计 .....             | 415 |
| <b>参考资料</b> .....                  | 426 |

# 第一篇 晶体管脉冲设备单元 电路的计算

## 第一章 脉冲变换电路的计算

### § 1.1 半导体二极管和晶体管的开关特性

#### 半导体二极管的静态和动态参数

为了合理地选用符合电路要求的二极管，必须了解二极管的静态和动态(过渡状态)特性。

图 1·1, *a* 和 *б* 给出了脉冲电路中常用的脉冲二极管 Д-18 (锗)和 Д-219А (硅)的伏安特性曲线。

二极管的伏安特性,尤其是它的起始部分,可用以下关系式近似地表示

$$I = I_0(e^{U/U_T} - 1) \quad (1.1)$$

式中,  $U_T$  是热电势,在温度为  $300^\circ\text{K}$  时等于  $0.026^*$  伏;  $I_0$  是

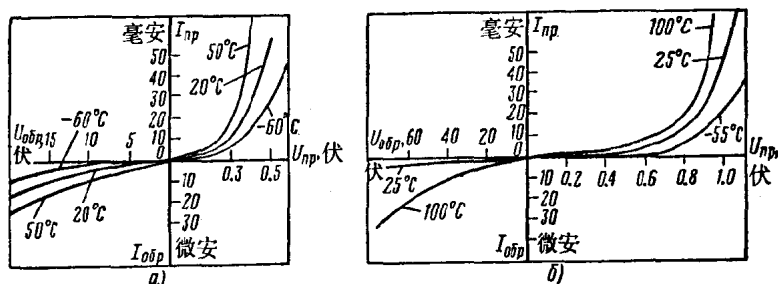


图 1·1 二极管的伏安特性

(a) Д-18 (锗)

(б) Д-219А (硅)

\* 原文误为 0.26 伏。——译者注。

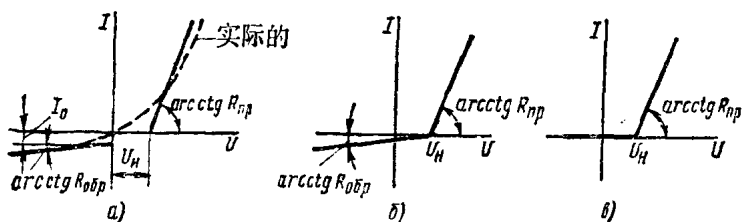


图 1-2 二极管伏安特性的近似化

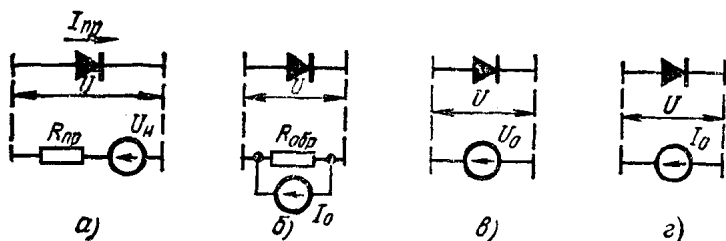


图 1-3 二极管的等效电路

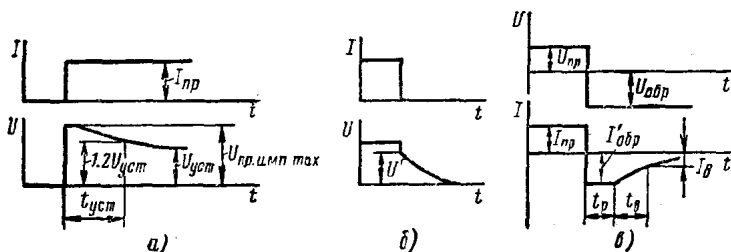


图 1-4 二极管的过渡特性

当二极管加上比  $U_T$  大若干倍的反向偏置电压时的电流； $\gamma$  是系数，对于锗管近似地等于 1，对于硅管近似地等于 2。

因此，通过二极管的正向电流与所加的电压近似地成指数关系，而且无论是正向电流  $I_{np}$  或反向电流  $I_{обр}$ ，都随温度升高而增大。

计算电路时，通常采用二极管的理想化伏安特性，也就是把实

实际的特性曲线近似为折线,图1·2,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  示出了被采用的三种近似化方案。采用第一种方案时,正向和反向电流为:

$$I_{np} = \frac{U - U_{\kappa}}{R_{np}} \text{ 和 } I_{op} = I_0 + \frac{U}{R_{op}} \quad (1.2)$$

由于伏安特性的理想化,在静态时,可以用电压源  $U_{\kappa}$  和电阻  $R_{np}$  的串联等效电路(图1·3,  $\alpha$ )代替导通的二极管,用电流源  $I_0$  和电阻  $R_{op}$  的并联等效电路(图1·3,  $\beta$ )代替截止的二极管。在数字设备中,二极管的导通和截止相应于逻辑 1 和 0,这是早已熟悉了的。在这种情况下,可以更加简单近似地用电压源  $U_0$  代替导通的二极管,用电流源  $I_0$  代替截止的二极管(图1·3,  $\gamma$  和  $\delta$ )。

有时,也要用到二极管的实际伏安特性,这将在串联二极管限幅器例子中看到。

二极管的动态特性受结电容、基区电阻对载流子浓度的从属关系等因素的影响。应该把结的扩散电容和充电电容区别开来。扩散电容是当导通二极管上电压改变时少数载流子电荷量的变化所形成的电容。由于这个电容与一个很小的  $R_{np}$  并联,因此它的影响可以忽略不计。反向偏置时的二极管电容  $C_{\mathcal{A}}$  主要影响二极管的惰性,  $C_{\mathcal{A}}$  值的大小在产品合格证中给出。

图1·4,  $\alpha$  给出了在矩形脉冲电流  $I_{np}$  的作用下二极管正向电压建立的过渡特性。电压的起始跳变是由基区电阻变化引起的,这个电阻在脉冲电流刚作用时为最大,它随着载流子浓度的增大而减小。电压的建立过程用脉冲电压的最大起始值  $U_{np\max}$  (或电阻  $R_{np\max}$ ) 和建立时间  $t_{ycm}$  来表示,建立时间就是二极管电压降 (或它的正向电阻) 减小到稳态值  $U_{np\text{ycm}}$  (或  $R_{np\text{ycm}}$ ) 时的 1.2 倍的时间。 $t_{ycm}$  和  $R_{np}$  的数值在手册上可以找到。

图1·4,  $\beta$  和  $\gamma$  示出了二极管截止时的过渡特性。其中图  $\beta$  为无反向偏置时二极管电流终止的情况。从二极管电流终止时开始,电压先骤然下降到注入电动势值  $U'$ ,然后再慢慢地下降,下降

的时间取决于二极管基区内少数载流子的寿命，下降时间通常为几个微秒。

图 8 所示的过渡特性，表示导通二极管加上反向偏置  $U_{обп}$  时所产生的过渡过程。在基区积累电荷消散的起始阶段，二极管电阻仍然很小，二极管的电流决定于控制电压源的电动势和内阻  $R_u$ ，在消散时间  $t_p$  期间内，它近似不变， $I'_{обп} \approx U_{обп}/R_u$ 。

随着基区电荷的消散，反向电流减小到稳态值。这个过程可以用反向电阻的恢复时间  $t_r$  来表示，它与二极管的正向驱动电流、截止电压的大小及其波形等因素有关。 $t_r$  就是反向电流下降到  $I_r$  的时间， $I_r$  比稳态值  $I_{обп}$  大三倍。

脉冲二极管的特性近似于理想开关的特性。例如，二极管 Д-18 (见图 1.1, a) 的惰性参数为：在  $I_{np} = 50$  毫安时，电阻  $R_{np}$  的建立时间不大于 0.08 微秒；在  $I_{np} = 50$  毫安、 $U_{обпу.мн} = 10$  伏时， $R_{обп}$  的恢复时间不大于 0.1 微秒；在  $U_{обп} = 3$  伏时，二极管的电容不大于 0.5 皮法。

二极管 Д-18 具有良好的参数并常用在脉冲电路中。

有时，在手册中把转移电荷  $Q_n$  作为二极管的参数， $Q_n$  等于反向电流在二极管恢复时间  $t_r$  内对时间的积分。由于  $Q_n$  与正向电流  $I_{np}$  的关系接近于线性，因此比值  $\frac{Q_n}{I_{np}}$  可以作为一个与二极管工作状态关系不大的参数。

二极管作为开关应用的例子有：限幅器、箝位器、二极管比较器和时间选择器。

在未讲这些问题之前，我们先简略地介绍一下在脉冲与数字技术中获得广泛应用的晶体管开关。

### 晶体管的开关状态

晶体管的开关特性在脉冲与数字技术的参考资料 [2, 19, 38,

44]中已经介绍过了。因此,这里只要引用一下共射极开关电路所需要的计算公式就可以了。最简单的共射极电路如图 1.5 所示。

开关状态可以用两个稳定状态(晶体管截止与饱和)和过渡过程来描述。

为获得截止状态,必须满足条件

$$u_{\delta} = u_{ex} - I_{K0mRX} R_{\delta} = U_{\delta 3} > 0 \quad (1.3)$$

其中,  $I_{K0mRX}$  是  $I_g = 0$  时的集电极最大起始电流;  $R_{\delta}$  是包括控制信号源  $u_{ex}$  的内阻在内的基极回路的总电阻。

考虑到一些不稳定因素(温度、电源电压、电路元件参数的变化等)的影响,为了可靠地截止晶体管,截止电压通常选定为(0.2~0.6)伏。

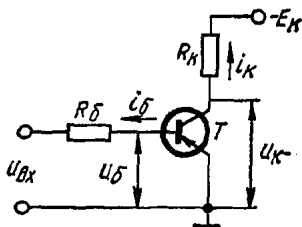


图 1.5 共射极开关

截止管的集电极电压

$$U_{K2} = -E_K + I_{K0} R_K \quad (1.4)$$

开关断开(晶体管处于截止状态)时的输出电阻  $R_{oblx}$  取决于晶体管的直流内阻  $E_K/I_{K0}$ (几百千欧)和电阻  $R_K$ (几千欧)的并联电阻。由于  $E_K \gg I_{K0} R_K$ , 因此  $R_{oblx} \approx R_K$ 。

当开关在接通状态时,晶体管应该饱和。为此,导通电压  $u_{ex}$  应使基极电流  $I_{\delta 1}$  大于饱和时的基极电流  $I_{\delta H}$ 。饱和深度用饱和系数表示

$$s = \frac{I_{\delta 1}}{I_{\delta H}} > 1 \quad (1.5)$$

晶体管饱和时的集电极电流

$$I_{KH} = \frac{(E_K - U_{KH})}{R_K} \approx \frac{E_K}{R_K} \quad (1.6)$$

其中,  $U_{KH}$  是饱和时的集电极电压,  $|U_{KH}| \ll |E_K|$ 。

当基极电流  $i_B = I_{BH}$  时, 可以认为晶体管还是工作在放大状态, 因此,

$$I_{KH} = \beta(I_{BH} + I_{K0}) + I_{K0} \approx \beta I_{BH} \quad (1.7)$$

其中,  $\beta$  是共射电路的直流电流放大系数。在式(1.7)中, 假定  $I_{BH} \gg I_{K0}$ 。

由关系式(1.5)、(1.6)和(1.7)可以确定为使晶体管饱和所需的基极电流

$$I_{B1} = s I_{BH} = \frac{s E_K}{\beta R_K} \quad (1.8)$$

根据所受脉冲干扰的强度和晶体管参数离散性,  $s$  值可选在 1.2 到 2 的范围内 (通常取  $s = 1.5$ )。

由于  $\beta$  值的大小与温度有关, 并且对于不同的晶体管,  $\beta$  值相差很大, 因此, 条件(1.8)应该在最小值  $\beta_{\min}$  时得到满足。选择适当大小的输入导通电压  $u_{BX}$  和电阻  $R_B$ , 可以保证得到所需要的  $I_{B1}$  值。

由图 1.5 得

$$I_{B1} = \frac{u_{BX}}{(R_B + r_{BXH})} \quad (1.9)$$

其中,  $r_{BXH}$  是晶体管饱和时的输入电阻。

为了减小不稳定值  $r_{BXH}$  对  $I_{B1}$  的影响, 必须使  $R_B \gg r_{BXH}$ 。

晶体管饱和时的电阻  $r_H = \frac{U_{KH}}{I_{KH}}$  比  $R_K$  小, 因此开关电路的输出

电阻  $R_{bix} \approx r_{H0}$ 。

当晶体管从截止状态转向饱和状态 (或相反), 集电极产生的电压跳变

$$U_{Km} = E_K - I_{K0} R_K - U_{KH} \approx E_K \quad (1.10)$$

上面推导的各种关系式, 可以用来选择开关电路的静态工作状态。

## 开关的过渡过程

假设在起始时晶体管在输入截止电压  $u_{ax}=E_1$  的作用下处于截止状态。在  $t=t_1$  时, 在输入端加入导通电压  $u_{ax}=E_2$ , 晶体管发射结被正向偏置, 基极电流 (还有发射极电流) 跃变到  $I_{\delta 1}=sI_{\delta H}$  (图 1·6)。按照晶体管的过渡特性, 集电极电流将按以下规律上升 [19]

$$i_K(t) = \beta s I_{\delta H} (1 - e^{-t/\tau_\beta}) \quad (1 \cdot 11)$$

其中,  $\tau_\beta = \beta \tau_\alpha$ ,  $\tau_\alpha =$

$\frac{1}{2\pi f_\alpha}$ ;  $f_\alpha$  是共基极电路的截止频率。在  $t=t_{\phi 1}$  时, 集电极电流达到  $i_K = I_{KH} = \beta I_{\delta H}$ 。

因此, 开关的接通时间

$$\begin{aligned} t_{\phi 1} &= \tau_\beta \ln \frac{\beta I_{\delta 1}}{\beta I_{\delta 1} - I_{KH}} \\ &= \tau_\beta \ln \frac{s}{s-1} \quad (1 \cdot 12) \end{aligned}$$

也就是说, 在  $t_{\phi 1}$  时间内, 电压  $u_K$  达到  $U_{KH}$ , 从  $t=t_2$  时起, 晶体管将进入饱和状态。这时, 射极、集电极和基极电流以及各电极间

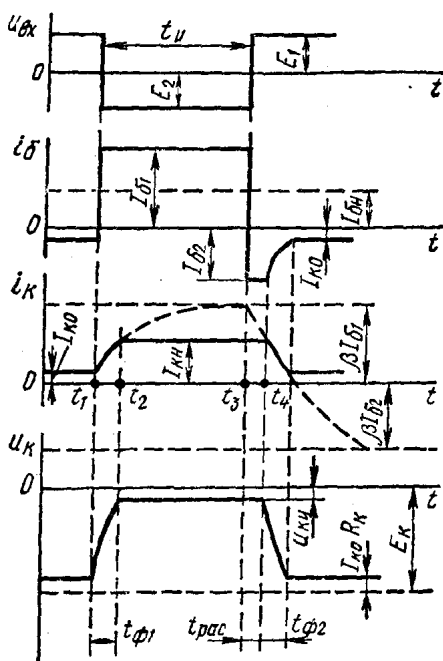


图 1·6 晶体管开关的过渡过程

电压实际上都保持不变。基区出现少数载流子剩余电荷的积存, 这种积存按积存时间常数  $\tau_H$  的指数规律进行。在大约  $3\tau_H$  时间内, 电荷积存到  $I_{\delta 1}\tau_H$  电平, 然后, 晶体管便进入稳定状态。

在  $t=t_3$  时,电路输入端加上截止电压,在它的作用下,基极电流变为  $I_{\delta 2}$  (这个电流流向晶体管的基极)。开关的关断过程包括少数载流子剩余电荷的消散阶段  $t_{pac}$  和晶体管的截止阶段  $t_{\phi 2}$ 。消散阶段的持续时间[19]

$$t_{pac} = \tau_H \ln \frac{sI_{\delta H} + |I_{\delta 2}|}{I_{\delta H} + |I_{\delta 2}|} \quad (1.13)$$

持续时间  $t_{pac}$  决定了晶体管开关的关断延迟时间。增大截止电流  $I_{\delta 2}$  和减小饱和系数  $s$ , 都可使  $t_{pac}$  减小。

当消散阶段结束时( $t=t_4$ ),晶体管进入放大区,并开始了截止过程。

在这个阶段中,集电极电流从起始值  $I_{KH}$  按指数规律(时间常数为  $\tau_\beta$ )下降。晶体管在截止阶段的持续时间

$$t_{\phi 2} = \tau_\beta \ln \left( 1 + \frac{I_{\delta H}}{|I_{\delta 2}|} \right) \quad (1.14)$$

晶体管截止时,集电极电压从  $U_{KH}$  变到  $E_K - I_{K0} R_K$ 。

必须指出,集电结的势垒电容  $C_K$  和负载电容  $C_H$  都影响持续时间  $t_{\phi 1}$  和  $t_{\phi 2}$ 。为了计及它们的影响,式(1.12)和(1.14)中的  $\tau_\beta$  必须用  $\tau'_\beta$  代替[19]

$$\tau'_\beta = \tau_\beta + R_K C_\Sigma \quad (1.15)$$

其中,  $C_\Sigma = \beta C_K + C_H$ 。

以上列出的这些关系式,可以用来选择将要讨论的基本开关电路(各种不同方案)的工作状态和元件参数。

### 晶体管开关电路的计算

我们来计算阻容耦合的开关电路(图1.7,  $a$ )。开关的负载为电阻  $R_H$  和电容  $C_H$ 。开关由输出电阻为  $R_u$  的负脉冲信号源控制,控制信号的波形如图1.7,  $b$  所示。通过计算,确定各连接元件  $R$ 、 $R_0$ 、 $C$ 、 $E_0$  的数值以及开关接通和关断时间。

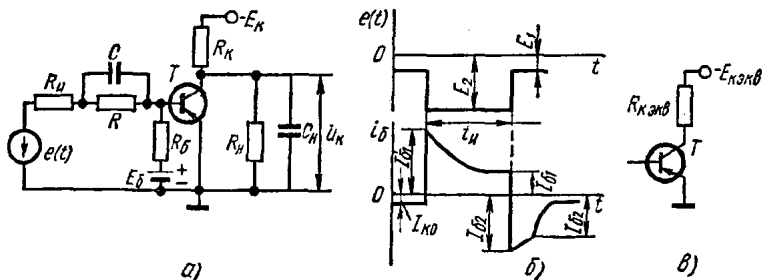


图 1.7 阻容耦合开关电路

耦合回路参数的选择，必须使开关工作条件得到满足。开关应在控制电压的低电平  $e(t) = E_1$  时关断，在高电平  $e(t) = E_2$  时接通（晶体管饱和）。

按照图 1.7, a, 晶体管截止时的基极电压为

$$u_{\delta} = \frac{(E_{\delta} - I_{K0} R_{\delta})(R_u + R) - E_1 R_{\delta}}{R_{\delta} + R + R_u} = U_{\delta 3} > 0 \quad (1.16)$$

其中， $U_{\delta 3}$  是给定的截止电压。

三极管导通时的基极电流

$$i_{\delta} = \frac{E_2 - |U_{\delta H}|}{R_u + R} - \frac{E_{\delta} + |U_{\delta H}|}{R_{\delta}} = I_{\delta 1} \quad (1.17)$$

其中， $U_{\delta H}$  是基极饱和电压； $I_{\delta 1}$  是给定的晶体管饱和电流。

求解方程(1.16)和(1.17)的  $R$  和  $R_{\delta}$ ，得

$$R_{\delta} = \frac{(R + R_u)(E_{\delta} - U_{\delta 3})}{U_{\delta 3} + E_1 + I_{K0}(R + R_u)} \quad (1.18)$$

$$R = \frac{(E_2 - |U_{\delta H}| - I_{\delta 1} R_u)(E_{\delta} - U_{\delta 3}) - (E_{\delta} + |U_{\delta H}|)(E_1 + U_{\delta 3} + I_{K0} R_u)}{(E_{\delta} - U_{\delta 3})I_{\delta 1} + (E_{\delta} + |U_{\delta H}|)I_{K0}} \quad (1.19)$$

根据已知的  $U_{\delta 3}$ 、 $I_{\delta 1}$ ，由这些公式就可以确定电阻  $R_{\delta}$  和  $R$ 。在这两个关系式中， $I_{K0}$  应取最高温度下的数值。

晶体管集电极负载  $R_n$  的接入，将导致集电极回路电阻的减小