



张俊科 编著

模拟开关电路

——原理与应用

湖南科学技术出版社

内 容 简 介

随着“四化”建设和人民生活水平的不断提高,电子计算机及数字技术将被广泛地应用。然而,它们的应用与模拟开关电路息息相关,休戚与共。因此,在应用计算机及数字技术的各个领域里,模拟开关电路是不可缺少的,它可以与数字开关电路媲美。

本书是由中国人民解放军国防科学技术大学张俊科同志编著的。本书系统地叙述了各类电子模拟开关电路的原理和精度,详细地介绍了模拟开关电路在许多领域中的应用。本书内容丰富,文笔通俗,理论联系实际,具有较大的实用价值,可供大专院校电气专业师生、厂矿企业电工和有关技术人员参考。

模 拟 开 关 电 路

——原理与应用

张 俊 科 编 著

责任编辑:陈清山

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1981年4月第1版第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 7.5 插页: 1 字数: 170,000

印数: 1—6,000

统一书号: 15204·56 定价: 0.80元

目 录

§ 1. 概述	(1)
1. 什么是模拟开关	(1)
2. 理想的模拟开关	(1)
3. 模拟开关与数字开关的区别	(3)
4. 模拟开关的主要应用	(3)
5. 模拟开关的基本型式及变型	(5)
6. 模拟开关的发展过程	(8)
§ 2. 晶体管模拟开关	(10)
1. 晶体管模拟开关原理与特性	(10)
2. 正接与反接	(12)
3. 公式推导	(18)
4. 残余电压 $V_{ce} = 0$ 的四种可能性	(25)
5. 模拟开关产生的误差	(25)
6. 晶体管模拟开关截止时的情况	(27)
7. 开关速度与瞬变现象	(28)
8. 单管模拟开关电路实例	(30)
9. 并联互补高精度模拟开关	(32)
10. 并联互补高精度模拟开关电路实例	(37)
11. 串联补偿晶体管模拟开关	(40)
§ 3. 结型场效应晶体管模拟开关	(44)
1. J-FET 的结构及工作原理	(44)
2. 结型场效应晶体管特性曲线	(50)

3. V_p 及 R_{ON} 同结构参数之间的关系	(55)
4. J-FET 模拟开关等效电路	(58)
5. J-FET 模拟开关的驱动方式	(62)
6. J-FET 模拟开关电路实例	(69)
§ 4. 金属氧化物半导体场效应晶体管模拟开关	(75)
1. MOS-FET 的工作原理	(75)
2. MOS-FET 特性曲线	(80)
3. MOS-FET 模拟开关原理	(87)
4. MOS-FET 模拟开关的工作波形	(95)
5. MOS-FET 模拟开关的电路实例	(97)
6. CMOS-FET模拟开关	(100)
§ 5. 二极管模拟开关	(107)
1. 二极管特性及等效电路	(107)
2. 单管模拟开关	(108)
3. 双管模拟开关	(110)
4. 四管模拟开关	(112)
5. 六管模拟开关	(116)
6. 二极管模拟开关电路实例	(117)
§ 6. 电流模拟开关	(120)
§ 7. 数字/模拟 (D/A) 转换	(129)
1. 二进制单极性电压相加的D/A转换器	(129)
2. 二进制双极性电压相加的D/A转换器	(136)
3. 二-十进制(BCD)电压相加的 D/A 转换器	(142)
4. 电流相加的D/A转换器	(150)
§ 8. 模拟/数字 (A/D) 转换器	(163)
1. 计数式反馈型A/D转换器	(163)
2. 跟踪式A/D转换器	(164)

3. 逐次比较式A/D转换器·····	(166)
4. 双极性A/D转换器的输入极性切换控制·····	(168)
5. 反码或补码输出的逐次比较式A/D转换器·····	(169)
6. 并行比较式A/D转换器·····	(174)
§ 9. 数字电压表 ·····	(181)
1. 计数式数字电压表·····	(181)
①单积分式·····	(182)
②双积分式·····	(184)
③脉冲调宽积分式·····	(188)
2. 逐次比较式数字电压表·····	(194)
§ 10. 采样保持电路 ·····	(199)
§ 11. 模拟多通道开关电路 ·····	(212)
1. 概述·····	(212)
2. 晶体管通道开关·····	(217)
3. 结型场效应晶体管通道开关·····	(226)
4. 金属氧化物半导体场效应晶体管通道开关·····	(232)

§ 1. 概 述

1. 什么是模拟开关

模拟开关是指以某种方式将模拟信号通、断的元件或电路，广义地说，手动的转动开关也包含在内。本书介绍的模拟开关电路是指用电子逻辑(数字)电路控制模拟信号(电压或电流)通、断的电路。它包括晶体管模拟开关(BJT.AS)、结型场效应晶体管模拟开关(J-FET.AS)、金属氧化物半导体场效应晶体管模拟开关(MOS-FET.AS)及二极管模拟开关(D.AS)。

模拟开关电路的构成如图1.1所示。它由“控制”电路及“开关”电路两部分组成。

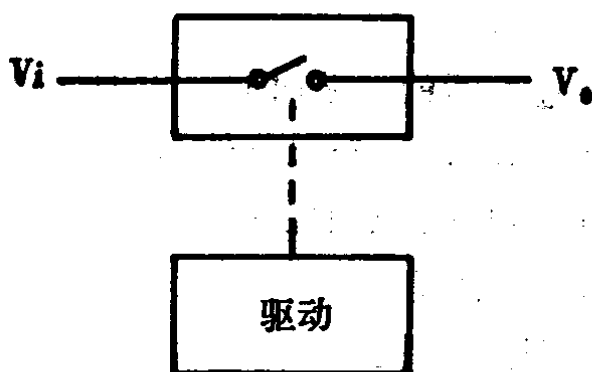


图1.1

2. 理想的模拟开关

图1.1是模拟开关的模型。控制驱动部分及开关部分都存在

理想模拟开关的必要条件。实际的模拟开关与理想的模拟开关特性越接近，说明实际的模拟开关电路性能越好。

表示模拟开关性能的特性有：静态特性、动态特性及寄生特性。

下面叙述这些特性及理想条件。

静态特性及理想条件

①开关元件输入输出间的电阻：设导通电阻为 R_{ON} ，截止电阻为 R_{OFF} ，则理想条件是 $R_{ON} = 0$ ， $R_{OFF} = \infty$ 。

②最大开闭电压、最大开闭电流：设最大开闭电压为 V_{imax} ，最大开闭电流为 I_{imax} ，则理想条件是 $V_{imax} \approx \infty$ ， $I_{imax} = \infty$ ，而且通过开关元件的电压、电流频率不受限止。

③驱动电路的功耗：设驱动电路的功耗为 W ，则理想条件为 $W = 0$ 。

动态特性与理想条件

①驱动电路接到控制信号时到开关元件动作间的延迟时间：设导通延迟时间为 t_{d1ON} ，截止延迟时间 t_{d1OFF} ，则理想条件是 $t_{d1ON} = 0$ ， $t_{d1OFF} = 0$ 。

②开关元件通、断的过渡时间：设通导过渡时间为 t_{d2ON} ，截止过渡时间为 t_{d2OFF} ，则理想条件为 $t_{d2ON} = 0$ ， $t_{d2OFF} = 0$ 。

③开关元件可以通、断的次数：设开关元件可以通、断的次数为 N ，则理想条件是 $N = \infty$ 。

寄生特性与理想条件：

①开关元件只通过需要的电压和电流，而不通过其他不必要的信号。

②开关元件与驱动部分是独立的，互相无干扰。

③具体特性如失调电压 ΔV ，失调电流 ΔI ，温差电势、尖峰等。

3. 模拟开关与数字开关的区别

电子数字计算机等大量使用的逻辑电路称为数字电路，它用“1”表示高电平，用“0”表示低电平。一般来说数字电路不必讨论精度问题。因为数字开关的任务是用两种状态分别表示数码“1”和“0”，所以只要能正确无误地区别数码“1”与“0”就可以了。

数字表示的特点是：当电平在一个小范围内变化时，它所表示的数码不会发生变化，仅当这种变化超过了规定范围，它们所代表的数码才发生变化。

模拟开关与数字开关不同，因为模拟开关是通、断模拟信号的，它应精密无误地传送模拟信号。实际模拟开关越接近理想模拟开关，才越能精密地传送信号。研究模拟开关时，讨论的重点是精度问题。

4. 模拟开关的主要应用

①由于电子技术的发展，电子数字计算机的应用范围正在不断扩大。在以电子计算机为中心的数据录取处理设备中，从原始传感器所得到的信号多数为模拟量，在这种情况下，由传感器所得到的模拟信号经过多通道开关选择、经A/D(模拟/数字)变换为数字信号，再送入到电子计算机中，由计算机录取并处理，如图1.2所示。在这一系统中，模拟开关是构成多通道电路及A/D变换器的基本电路。

②在电子计算机为中心构成的现代控制系统中，例如由图1.3所示的武器控制系统中，雷达测量敌机的方位角、距离、高

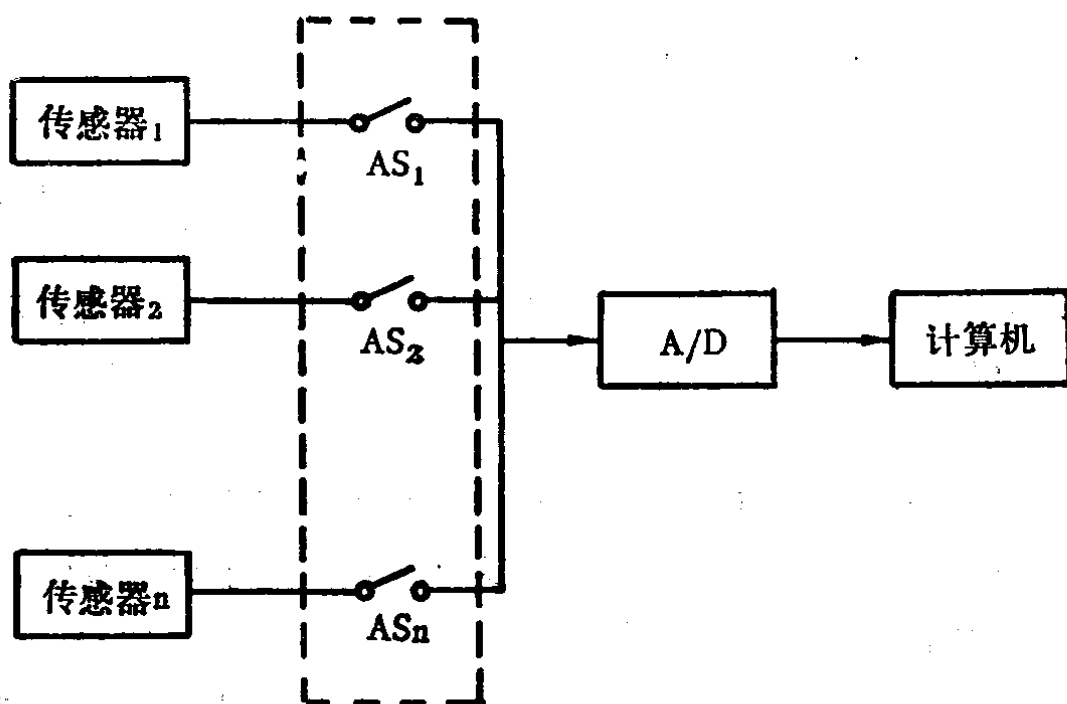


图1.2

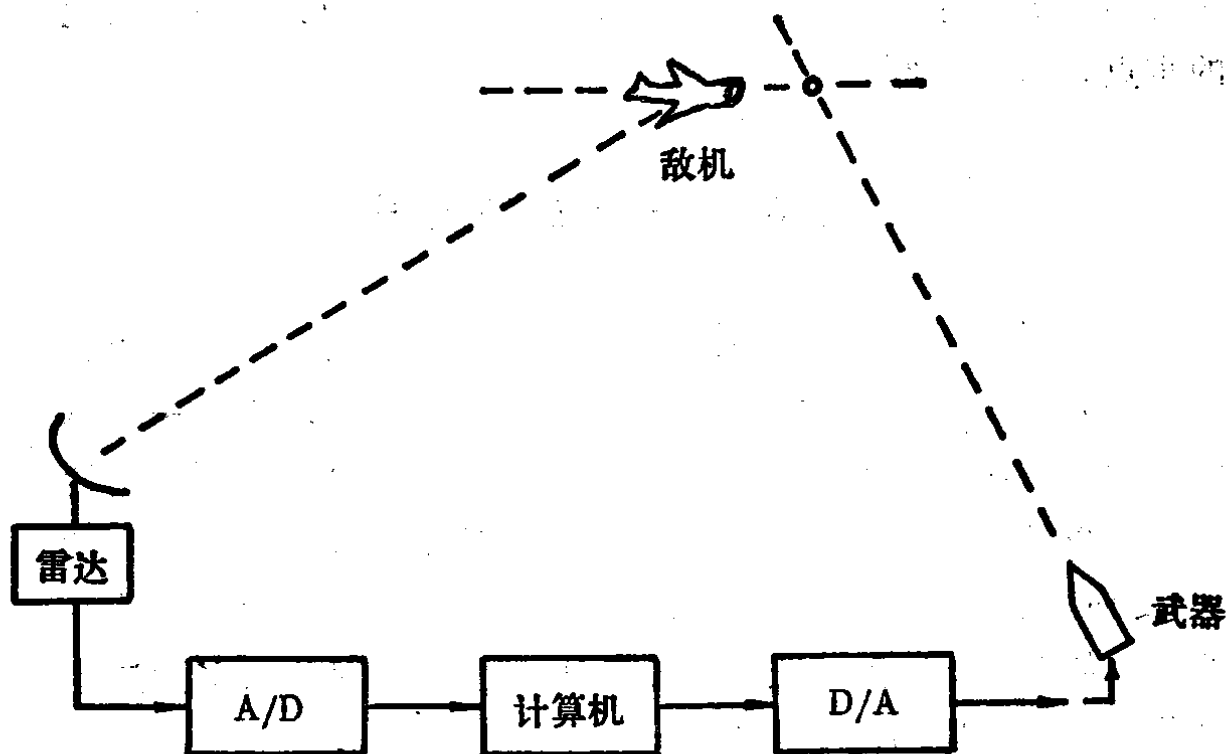


图1.3

低角，而后经过A/D(模拟/数字)转换设备，输入到电子计算机中，计算机算出武器发射时的水平瞄准角和高低瞄准角，以便控制武器的发射。

在这样的数字控制系统中，A/D及D/A(数字/模拟)是不可缺少的。武器射击敌机的准确度固然与雷达测量目标的准确性、计算机计算的准确性有关，但也与计算机两端的A/D及D/A的精度有密切关系。模拟开关电路是影响A/D及D/A精度的重要电路。

③在仪表领域中，为提高测量仪表精度，使模拟仪表数字化是当前发展的趋向之一。只用模拟手段，直到目前为止达到简便地高精度测量仍然有困难，而经过数字化之后，测量精度便显著改善。最近十多年来，数字电压表已经比较普遍使用了，它容易作到一般指针仪表不可能达到的高精度测量。数字电压表中的核心部件是A/D转换器，因而模拟开关在数字仪表中有广泛的应用。

④在现代化的PCM(脉冲代码调制)通信设备中，把声音变换为数字信号后，再多路传输，而后将信号恢复为声音信号，这里需要高速A/D转换器。

⑤此外，模拟开关电路在多通道电路、采样保持电路、运算放大器操作电路中都是必须要用的电路。

总之，模拟开关电路已经是多种设备中常用的一类基本电路。因此，需要专门研究这类电路的构成、原理和精度等问题。

5. 模拟开关的基本型式及变型

模拟开关通常有下面两种简单的基本型式：

①串联开关——开关总是与负载串联。无论开关是接通还

是断开，信号电流 I_i 与负载电流 I_L 总是相同的，即 $I_i = I_L$ ，如图1.4(a)所示。

②并联开关——开关总是与负载并联。当开关断开时， $I_i = I_L$ ；当开关接通时， $I_i = V_i/R_i$ ， $I_L = 0$ ，如图1.4(b)所示。

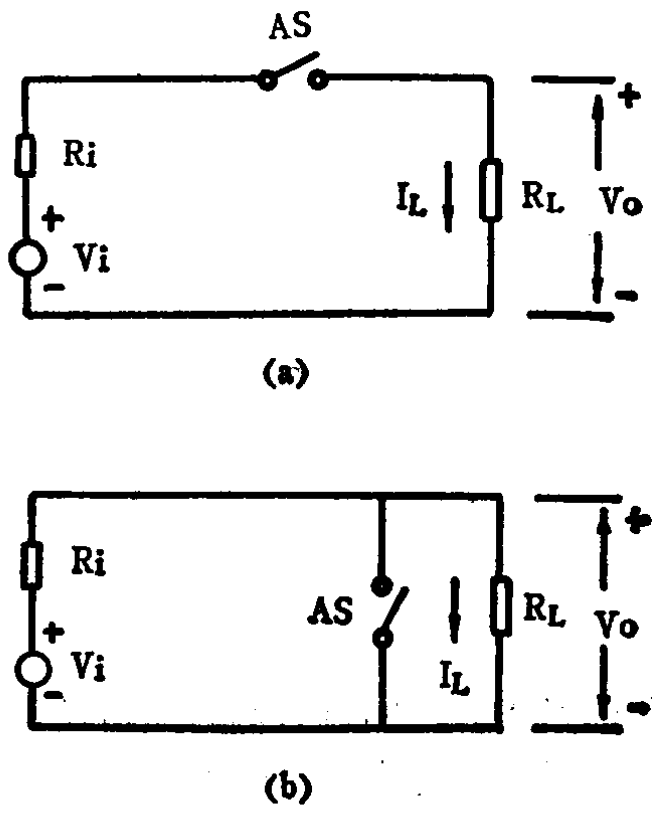


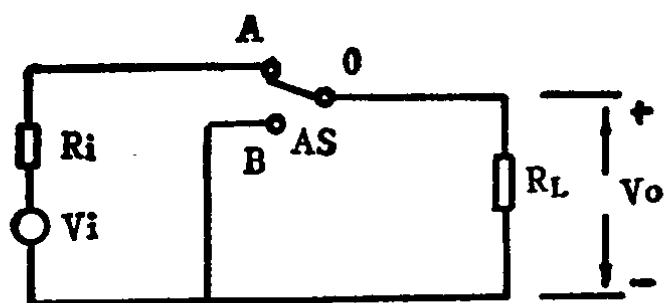
图1.4

上述基本开关的两种基本组合如图1.5所示。

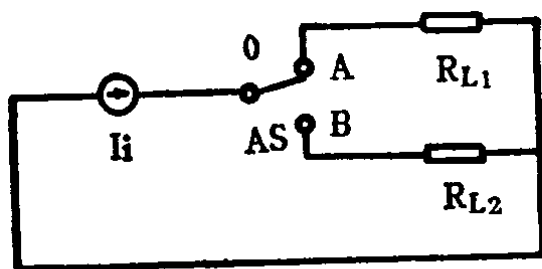
①串联分路电压开关——当开关处于位置A 时，电压源接在负载电阻 R_L 两端，当开关处于位置B 时，负载与地短路，如图1.5(a)所示。

②串联分路电流开关——当开关处于位置A 时，电流源 I_i 流向负载 R_{L1} ，当开关处于位置B时，电流源 I_i 流向负载 R_{L2} ，如图1.5(b)所示。

图1.5所示的开关，实际上是由两个串联开关构成的，如图



(a)



(b)

图1.5

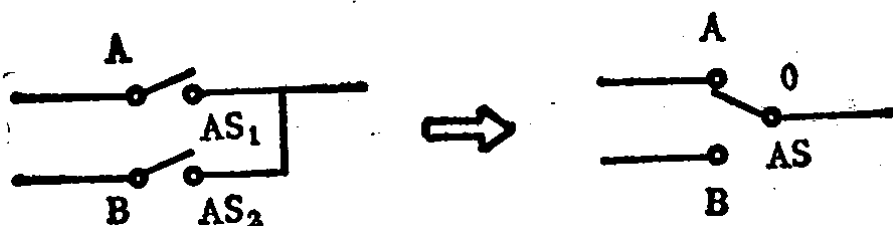


图1.6

1.6所示。注意 AS_1 及 AS_2 总是一开一闭。

根据开关的换接对象是电压还是电流，可以把开关分为：

①电压开关——当开关断开时，跨于它的两端电压总是和被换接的电压 V_i 有关，通过开关的电流与负载 R_L 有关。

②电流开关——不管负载 R_L 的值是多大，流过开关的电流总是和被换接的电流 I_i 相等。被换接的电压由 R_L 与 I_i 决定。

根据信号回路与控制回路是否相联，可把开关分为：

① 电流隔离开关——理论上是信号回路与控制回路之间无电流联系，实际上由于寄生电容等，这两个回路之间存在弱耦合。

② 直接耦合开关——在信号回路与控制回路之间有电流联系，不是电流隔离的。

根据控制开关的方式，开关可分为：

① 电压控制开关——它是由电压控制接通的。

② 电流控制开关——它是由电流控制接通的。

6. 模拟开关的发展过程

模拟开关大体上分为两大类：机械触点开关及半导体器件开关。模拟开关的发展首先是机械触点开关，如一般继电器、舌簧继电器、水银继电器等。在模拟开关的静态特性方面机械触点开关可以近似看作为理想模拟开关，接通时导通电阻几乎为0，断开时电阻几乎为 ∞ ，此外，在通、断的任何一种状态下，无电压与电流的偏移，但是机械触点开关由于存在着体积、速度、寿命等方面的问题，后来向半导体器件开关发展。半导体模拟开关包括二极管模拟开关、晶体管模拟开关、结型场效应晶体管模拟开关和金属氧化物半导体场效应晶体管模拟开关。

晶体管的发展是获得经济实用的电子模拟开关重要的一步。当人们发现晶体管“反接”工作状态具有很小的偏移电压后，使得晶体管可能作为高精度模拟开关使用。后来，没有偏移电压的结型场效应晶体管的出现，精密模拟开关又向前发展了一步。金属氧化物半导体场效应晶体管模拟开关虽然在模拟开关的主要性能方面比结型场效应晶体管模拟开关没有什么大的改

进，但是为模拟开关集成化创造了条件，即能够把多个模拟开关作在同一块硅半导体基片上。

半导体器件模拟开关，开始是分立元件的，后来向集成化发展。但是有了集成化模拟开关后，机械触点开关及分立元件开关还在不同的范围内应用。这是因为目前任何一种模拟开关都不能完全代替别的模拟开关。各种模拟开关都因有自己的优点而继续存在和发展，象二极管模拟开关因为具有高速性能而在高速采样保持电路中继续使用，象水银触点开关还有新的用途并在继续发展中。

由于光敏晶体管及发光二极管的诞生，人们有可能得到长期以来希望得到的“电子继电器”，使得理想的模拟开关有了新的希望。

§ 2. 晶体管模拟开关

在各种电子式模拟开关中，晶体管模拟开关是用得较多的一种。

1. 晶体管模拟开关原理与特性

我们知道晶体管一般有三种工作状态：截止状态、放大状态、饱和状态。当发射结与集电结电压都是反向偏置时，晶体管处于截止状态；当发射结电压为正向偏置而集电结电压为反向偏置时，晶体管处于放大状态；当发射结与集电结都是正向偏置时，晶体管处于饱和状态。

晶体管作模拟开关是用其截止与饱和两种工作状态。因为晶体管在截止状态时的电流很小，其集电极与发射极之间是不导通的，所以可以作模拟开关的断开状态。晶体管在饱和状态

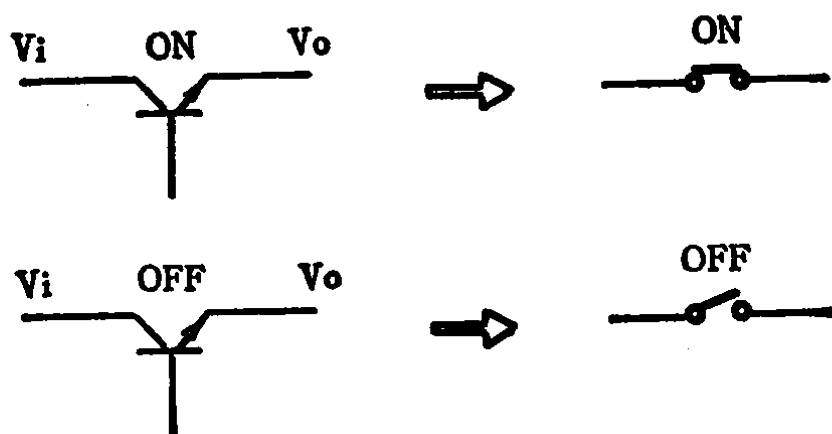


图2.1

时，集电极与发射极之间的压降与电阻都很小，可以作为导通状态，如图2.1所示。

图2.2示出了 I_c-V_{ce} 特性曲线，把该特性曲线的零点附近放大时得到图2.3所示的曲线。由图可见 I_c-V_{ce} 曲线不完全与零点相交。当 $I_c=0$ 时， V_{ce} 不等于零。称 $I_c=0$ 时 $V_{ce}=V_o$ 为残余电压（或称为偏移电压、失调电压）。

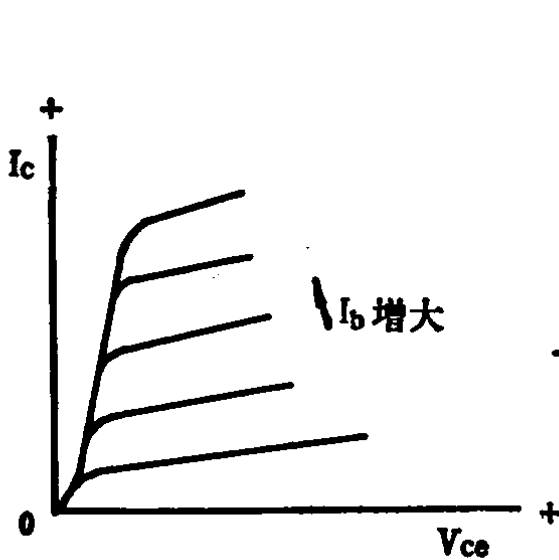


图2.2

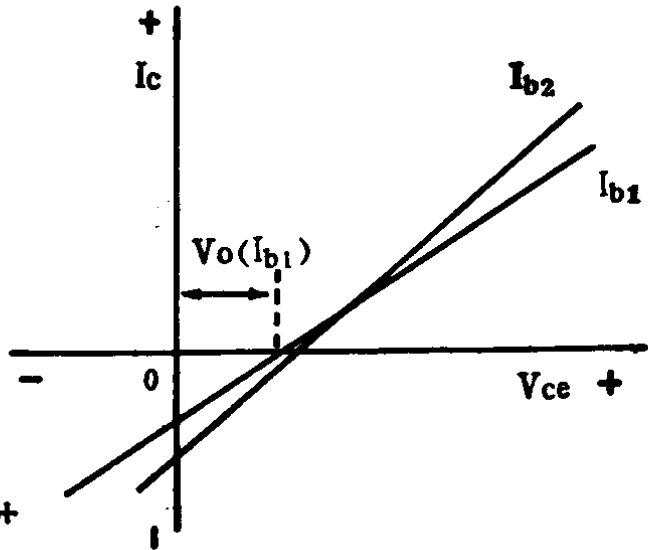


图2.3

晶体管导通时的简化等效电路如图2.4a所示， R_{oN} 为导通电

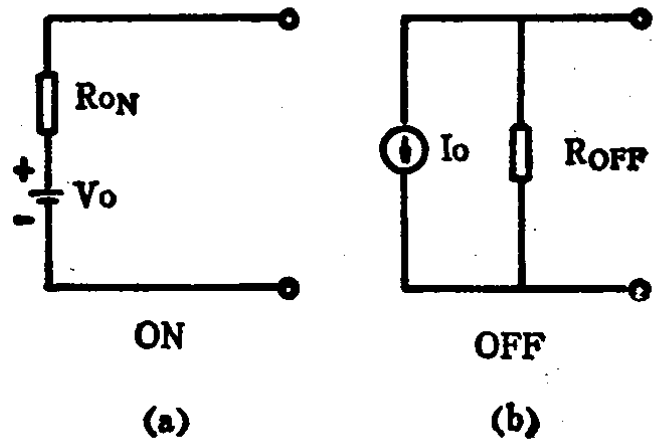


图2.4

阻, R_{ON} 可由 I_c-V_{ce} 的特性曲线的斜率 $\Delta V_{ce}/\Delta I_c$ 求得。晶体管截止时的简化等效电路如图2.4b所示, 图中用恒流源表示失调电流, R_{OFF} 表示截止电阻。

2. 正接与反接

制作模拟开关时, PNP晶体管与NPN晶体管各有两种接法, 如图2.5所示。图2.5a、b的区别是PNP发射极与集电极的互换;

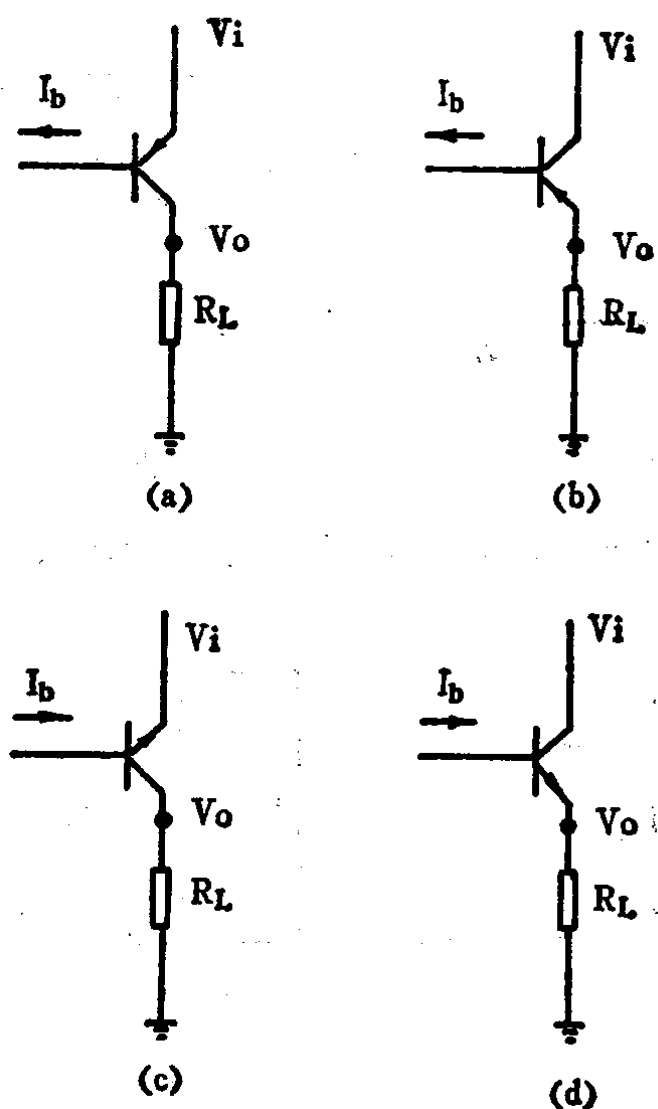


图2.5