

晶体管脉冲电路与数字集成电路

清华大学晶体管脉冲电路与数字
集成电路编写组编写

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书重点讨论在通信、雷达中常见的、比较典型的晶体管脉冲电路和数字集成电路；阐述脉冲电路和逻辑部件的分析、设计和调测方法；同时介绍有关的数学、物理和电工知识。内容深入浅出，理论联系实际，以讲清物理概念为主，既有定性分析，也有定量估算，并用较多的篇幅讲实用电路的例子，便于通信、雷达专业学生及有关部门的工作人员自学参考。本书分上、下册，上册为晶体管脉冲电路，下册为数字集成电路。

晶体管脉冲电路与数字集成电路

下 册

清华大学《晶体管脉冲电路与数字
集成电路》编写组编著

•

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本：787×1092 1/32 1978年6月 第 一 版

印张：12 16/32页数：200 1979年12月河北第2次印刷

字数：287千字 印数：99,001—280,800册

统一书号：15045·总2151—无626

定价：1.00 元

目 录

第三部分 数字电路

第十三章 晶体管逻辑门电路	(1)
1 二极管“与”门电路.....	(1)
2 二极管“或”门电路.....	(5)
3 “与”门和“或”门的联系.....	(7)
4 二极管门电路的设计.....	(9)
5 晶体管“与非”门电路和“或非”门电路.....	(15)
6 门电路的应用举例.....	(23)
第十四章 集成逻辑门电路	(27)
1 数字集成电路的特点及其分类.....	(27)
2 <i>DTL</i> 门电路.....	(28)
3 <i>TTL</i> 门电路.....	(31)
4 <i>CML</i> “或非”门电路简介.....	(59)
5 <i>HTL</i> 门电路简介.....	(63)
第十五章 集成电路触发器	(67)
1 <i>R—S</i> 触发器.....	(67)
2 <i>D</i> 触发器.....	(76)
3 <i>J—K</i> 触发器.....	(91)
4 集成电路触发器的触发方式.....	(101)
5 集成电路触发器的参数及测试.....	(114)

第十六章 数字集成电路用作波形的产生和变换 (122)

- 1 集成“与非”门的开关特性 (122)
- 2 单稳态触发器 (125)
- 3 多谐振荡器 (131)
- 4 鉴幅器 (137)

第十七章 金属—氧化物—半导体场效应管集成电路

与集成注入逻辑电路 (143)

- 1 绝缘栅场效应管的工作原理 (143)
- 2 MOS集成电路的基本逻辑电路 (156)
- 3 集成注入逻辑电路简介 (167)

第四部分 数字电路的应用

第十八章 逻辑代数 (174)

- 1 引言 (174)
- 2 逻辑代数基本运算法则 (175)
- 3 逻辑代数应用举例 (178)
- 4 卡诺图 (185)
- 5 用卡诺图实现逻辑简化举例 (192)

第十九章 逻辑部件 (197)

- 1 触发器的逻辑特性 (197)
- 2 寄存器和移位寄存器 (201)
- 3 计数器的加、减、可逆计数 (208)
- 4 同步计数器 (216)
- 5 任意进制计数器 (219)
- 6 二—十进制计数器 (227)
- 7 格雷码计数器 (235)

8	二进制译码器	(241)
9	分配器	(249)
10	“码”信号发生器	(252)
第二十章	数码显示	(261)
1	辉光数字管显示器	(261)
2	荧光数字管显示器	(268)
第二十一章	数字—模拟转换	(275)
1	引言	(275)
2	并行数字—模拟转换器	(279)
3	解码网络中的电子开关和恒流源	(289)
第二十二章	模拟—数字转换	(293)
1	引言	(293)
2	并行模拟—数字转换器	(294)
3	并串行模拟—数字转换器	(297)
4	逐位比较型模拟—数字转换器	(301)

第五部分 附 录

附录 1	雷达平面位置显示器	(311)
附录 2	同步式固定幅度扫描发生器	(324)
附录 3	电视行扫描介绍	(328)
附录 4	功率晶体管的击穿特性和保护	(337)
附录 5	$MF-1$ 型码发生器和 $WM-1$ 型误码分 析仪	(341)
附录 6	微波调相数据传输终端机信码再生器	(357)
附录 7	32路增量调制终端机发送端定时系统	(372)
附录 8	有关TTL电路使用的一些问题	(381)

第十三章 晶体管逻辑门电路

在数字系统中，如电子计算机、数据处理、数字通信和数字仪表中，门电路是应用很广泛的电路。所谓“门”就是一种开关，它能按照一定的条件去控制数字信号通过或不通过。由于晶体管数字电路是学习数字集成电路的基础，并且目前晶体管数字电路还在大量使用，所以我们先讨论晶体管门电路。

基本的门电路有“与”门、“或”门和“非”门三种，下面分别加以介绍。

1. 二极管“与”门电路

1.1 二极管的箝位作用

在分析二极管门电路之前，首先介绍一下二极管在正向导电时的“箝位”作用。

在图 13.1.1 (a) 中，当 A 点电位 $V_A = E$ ，且 $E < E_0$ 时，二极管 D_A 导通。由于二极管 D_A 正向导通时两端压降很小（通

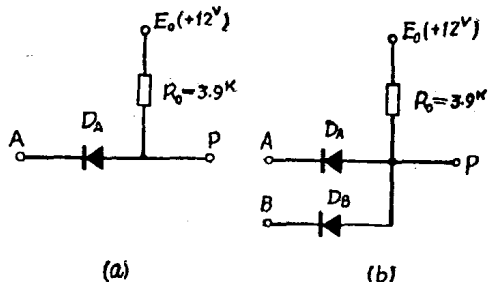


图 13.1.1 二极管的箝位作用

常硅二极管正向压降约为 0.7 伏，锗二极管正向压降约为 0.3

伏), 可以忽略, 故 P 点的电位 $V_p \approx V_A = E$ 。当 $E = 0V$, 则 $V_p \approx 0V$; 当 $E = +3V$, 则 $V_p \approx +3V$ 。二极管对 P 点电位的这一箝制作用, 简称二极管的箝位作用。严格地说, 这是“电平箝位”, 它与第二章 6 节介绍的“波形箝位”不同。

对于图 13.1.1(b), 设 A 点电位为 $0V$, B 点电位为 $+3V$ 。根据二极管的箝位作用, 由于 D_A 两端的电位差较大, D_A 优先导通, P 点被箝位在 $0V$ 。这时二极管 D_B 是反向偏置, 处于截止状态。可见当有两个输入端时, 若两个输入端电位不相等, 则 V_p 被箝制在低电位上。

1.2 二极管“与”门

“与”门电路是完成逻辑乘法的一种线路。所谓逻辑乘法也就是“与逻辑”的意思。这在日常生活中也会遇到。例如在图 13.1.2 所示电路中, 只有当开关 A 和 B 全都合上时, 灯才会亮; A 和 B 中只要有一个开关未合上, 灯就不亮。这个例子表明了这样一种因果关系: 只有决定一件事的全部条件都具备时, 这事才能成功。我们把这种关系称为“与逻辑”关系。

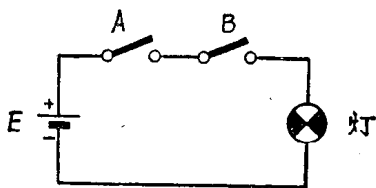


图 13.1.2 “与”逻辑示意图

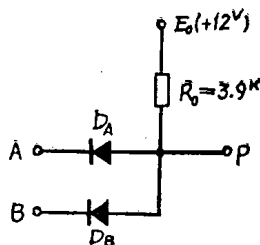


图 13.1.3 “与”门电路

在数字电路中, “与”门不是用手动开关构成, 而是用二极管、三极管组成的快速、无触点电子开关构成的。

图 13.1.3 是二极管“与”门电路。下面我们讨论在几种不同

输入情况下, P 点的输出情况。

(1) A 和 B 输入均为低电位 $0V$ 时, 由于二极管 D_A 和 D_B 都是正向偏置, 所以 D_A 和 D_B 均导通, P 点被箝位在 $0V$, 输出为低电位 $0V$ 。

此时流过 R_0 电阻的电流为 $I_{R_0} = \frac{E_0 - V_P}{R_0} \approx \frac{E_0}{R_0}$, 流过 D_A 和 D_B 的电流为 $I_A = I_B = \frac{1}{2} \cdot I_{R_0} = \frac{E_0}{2R_0}$ 。

(2) A 输入为低电位, B 输入为高电位。由于 D_A 两端的电位差最大, 优先导通, P 点被箝制在 $0V$, 输出为低电位 $0V$ 。

由于 P 点电位为 $0V$, 所以二极管 D_B 是反向偏置, 处于截止状态, 没有电流流过。

此时流过电阻 R_0 和二极管 D_A 的电流为:

$$I_A = I_{R_0} = \frac{E_0 - V_P}{R_0} \approx \frac{E_0}{R_0}$$

当 A 输入端为高电位 $+3V$ 、 B 输入端为低电位 $0V$ 时, 情况类似, 不再详述。

(3) 当 A 输入和 B 输入均为高电位 $+3V$ 时, 由于二极管 D_A 和 D_B 的两端电位差相同, 而且都是正向偏置, 都导通, P 点被箝制在 $+3V$, 输出为高电位 $+3V$ 。

此时流过电阻 R_0 的电流为 $I_{R_0} = \frac{E_0 - V_P}{R_0} = \frac{E_0 - 3}{R_0}$ 。流过二极管 D_A 和 D_B 的电流为 $I_A = I_B = \frac{E_0 - 3}{2R_0}$ 。

上述输入端 A 、 B 和输出端 P 的关系, 见表 13.1.1。从表

表 13.1.1 图 13.1.3 电路输入与输出电压对照表

输 入	A	$0V$	$0V$	$+3V$	$+3V$
	B	$0V$	$+3V$	$0V$	$+3V$
输 出	P	$0V$	$0V$	$0V$	$+3V$

中可以清楚地看出, 当输入 A 和 B 都为高电位时, 输出 P 才为高电位; 当输入 A 和 B 中有一个为低电位 $0V$, 或两个都为低电位 $0V$ 时, 输出 P 便为低电位 $0V$ 。这满足了“与逻辑”关系。所以图13.1.2电路称为二极管“与”门电路。

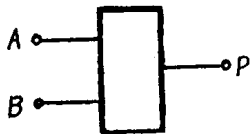
在数字电路中, 常用“1”和“0”来表示两种对立的状态, 如电位的高和低, 脉冲的有和无等。用“1”表示高电位, “0”表示低电位, 则表13.1.1可写成表13.1.2。从表13.1.2可见: 当 A 和 B 都为“1”时, P 才是“1”; 当 A 和 B 中有一个或者全部为“0”时, P 都为“0”。这是一种“与”逻辑的关系, 又称逻辑乘。在逻辑代数中(详见第十八章), 它的逻辑代数表达式为:

表 13.1.2 “与”门真值表

输 入	A	0	0	1	1
	B	0	1	0	1
输 出	P	0	0	0	1

$$P = A \times B \text{ 或 } P = A \cdot B \text{ 或 } P = AB$$

在上式中, P 、 A 和 B 只能取“0”或“1”。“ $\times$ ”号表示“逻辑乘”的运算。它的逻辑符号如图13.1.4。



“与”门的输入端可以不止两个。

图13.1.5(a)所示为5个输入端的“与”

门, 图13.1.5(b)为它的逻辑符号。它的逻辑代数表达式为:

$$P = A \times B \times C \times D \times E$$

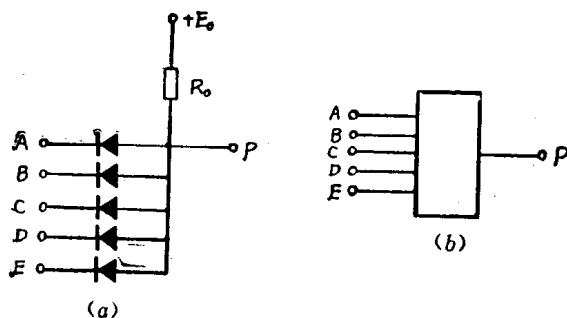


图 13.1.5 “与” 门

2. 二极管“或”门电路

“或”门电路是一种完成“逻辑加法”的电路，也就是“或逻辑”。如图13.2.1所示电路，当开关 A 和 B 中只要有一个接通或者两个都接通，灯就亮；只有当 A 和 B 都断开时，灯才不亮。这个例子表明了这样一种因果关系：在决定一件事情的各种条件中，只要有一个条件满足，或者几个条件满足。这件事就会发生。我们把这种因果关系称为“或逻辑”。“或逻辑”就是： A 或者 B 有一个条件满足就成的意思。

二极管“或”门电路如图13.2.2所示。它也是利用二极管的箝位作用来实现其“或逻辑”关系的。

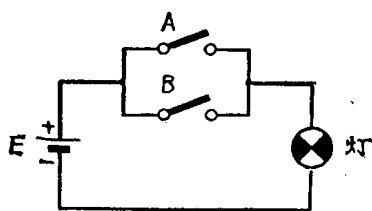


图 13.2.1 “或”逻辑示意图

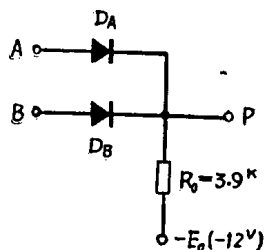


图 13.2.2 “或”门电路

(1) 当输入 A 和 B 都为低电位 $0V$ 时, 由于二极管 D_A 和 D_B 都为正向偏置, 所以都导通。 P 点电位被箝制在 $0V$, 输出为低电位 $0V$ 。

(2) 当 A 输入为高电位 $+3V$ 、 B 输入为低电位 $0V$, 由于二极管 D_A 两端的电位差最大, 所以优先导通, 使 P 点电位被箝制在 $+3V$, 输出为高电位 $+3V$, 而二极管 D_B 被反向偏置而截止。

(3) 当 A 输入和 B 输入都为高电位 $+3V$, 二极管 D_A 和 D_B 都被正向偏置而且两端电位差相等, 所以都导通, P 点电位被箝制在 $+3V$, 输出为高电位 $+3V$ 。以上三种情况见表 13.2.1。

从表 13.2.1 可以清楚地了解“或逻辑”关系。当 A 和 B 输入中有一个或者两个都为高电位 $+3V$ 时, P 输出均为高电位; 只有当 A 和 B 都为低电位 $0V$ 时, P 输出才为低电位。这满足了“或逻辑”关系。所以, 图 13.2.2 电路称为二极管“或”门电路。

表 13.2.1 图 13.2.2 电路的输入与输出电压对照表

输 入	A	$0V$	$+3V$	$0V$	$+3V$
	B	$0V$	$0V$	$+3V$	$+3V$
输 出	P	$0V$	$+3V$	$+3V$	$+3V$

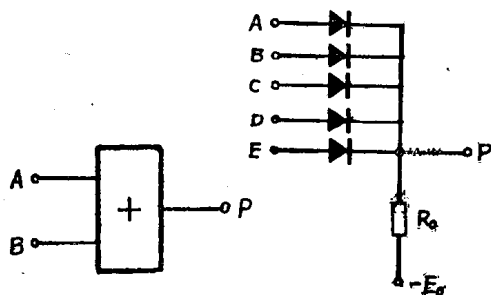
若用“1”表示高电位 $+3V$, 用“0”表示低电位 $0V$, 则表 13.2.1 可变成表 13.2.2。从表 13.2.2 可以看出这样一种关

表 13.2.2 “或门”真值表

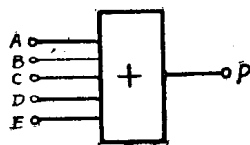
输 入	A	0	1	0	1
	B	0	0	1	1
输 出	P	0	1	1	1

系: A 和 B 中只要有一个为“1”或者两个都为“1”, 则 P 为“1”; 只有当 A 和 B 全为“0”时, P 才为“0”。这种逻辑关系叫做“或逻辑”, 又称逻辑加法。它的表示符号如图 13.2.3。它的逻辑代数表达式为:

$$P = A + B$$



(a)



(b)

图 13.2.3 “或”门符号

图 13.2.4 “或”门

注意此处“+”表示“或逻辑”, 是逻辑代数中的一种运算符(其运算规律见表 13.2.2)。它和普通代数中“+”的含义不同, 在普通代数中 $1+1=2$, 而在这里 $1+1=1$ 。

同“与”门一样, “或”门的输入端也可以有很多个。图 13.2.4(a)是一个五个输入端的“或”门。图 13.2.4(b)是它的逻辑符号。它的逻辑代数表示式为:

$$P = A + B + C + D + E$$

3. “与”门和“或”门的联系

在逻辑代数中, “与”和“或”是两个不同的概念。“与”就是所有的输入端都为“1”, 输出才为“1”; 否则输出为“0”。“或”则是当输入端中只要有一个为“1”, 输出就为“1”; 只有当所有的

输入端都为“0”时，输出才为“0”。

在设计逻辑电路时，若是以“1”表示高电位，以“0”表示低电位，这种规定称为“正逻辑”。在这个前提下，我们称图 13.1.3 为“与”门电路，图 13.2.2 为“或”门电路（严格地讲，应该称为“正与门”、“正或门”）。

事实上，还有另外一种规定，即：用“0”表示高电位，用“1”表示低电位，这种规定称为“负逻辑”。按此规定，图 13.1.3 电路的输入与输出电位对照表 13.1.1 可写成表 13.3.1。从表 13.3.1 可见图 13.1.3 电路是一“负或门”电路。同理，图 13.2.2 电路的输入与输出电压对照表 13.2.1 按负逻辑可写成表 13.3.2。由此表可见图 13.2.2 电路是一“负与门”电路。

表 13.3.1 “或逻辑”真值表

输 入	A	1	1	0	0
	B	1	0	1	0
输 出	P	1	1	1	0

表 13.3.2 “与逻辑”真值表

输 入	A	1	0	1	0
	B	1	1	0	0
输 出	P	1	0	0	0

通过上面的讨论可知：“与”门和“或”门这一对矛盾在一定的条件下各自向着自己的对立面转化。这一条件就是采用“正逻辑”、还是采用“负逻辑”。

“与”和“或”互相转化的事实从图 13.1.2 的例子也可以说明。如果以灯“亮”表示“1”，图 13.1.2 是个“与逻辑”，

即只有当开关都合上时,灯才亮。反之,若以灯灭表示“1”,则图13.1.2是个“或逻辑”,即只要有一个开关是打开的,灯就灭。

在本书中,除特殊情况注明“负逻辑”外,一般都是指“正逻辑”。

4. 二极管门电路的设计

上面我们讨论了门电路的工作原理,本节我们主要以“与门”为例,介绍如何设计门电路的方法。

4.1 二极管的选择

二极管是门电路的重要元件,它的性能好坏对电路影响很大。

(1) 二极管正向压降的影响

前面分析门电路的工作原理时,为了突出主要的逻辑关系,我们忽略了较小的二极管的正向压降的影响。事实上锗二极管有 $0.3V$ 左右正向压降,硅二极管有 $0.7V$ 左右正向压降,在设计计算时应该予以考虑。如图13.1.3所示的电路中,用了锗开关管,则由于它有 $0.3V$ 的正向压降,使输出高电位为 $3.3V$,低电位为 $0.3V$,与原来的数值差 $0.3V$ 。如果改用硅开关管,则由于它有 $0.7V$ 的正向压降,而使输出高电位为 $+3.7V$,低电位为 $0.7V$,与原来的数值差 $0.7V$ 。

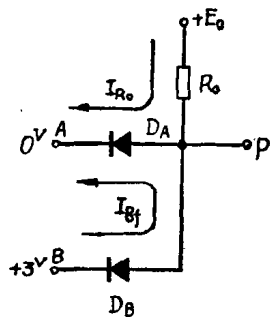


图 13.4.1 门电路中的电流

在实际应用中,希望二极管的正向压降越小越好。从这个

角度来看, 选锗管比硅管好。

(2) 二极管反向电流的影响

二极管加反向电压时有很小的反向电流。如图13.4.1中的情况, $V_A = 0V$, $V_B = +3V$, D_A 导通, D_B 截止, 则流过二极管 D_A 中的电流为:

$$I_A = I_{R0} + I_{BF}$$

I_{BF} 就是二极管 D_B 的反向电流。锗管的反向电流约为 $10\mu A$ 左右, 硅管的反向电流为零点儿微安, 一般可以忽略不计。

一般情况下, 反向电流很小, 影响不大, 只有在高温工作时 ($50^\circ C$ 以上) 需要给予考虑。

从这个角度看, 特别是工作在高温的环境下, 选用硅管较好。

4.2 二极管门电路中电源 E_0 和电阻 R_0 的选择

对一个理想的二极管“与”门, 我们总希望:

1. 输入端对前一级的影响越小越好;
2. 输出端带负载的能力尽可能大。

为了不致被一些非主要的因素分散我们的注意力, 我们还是用理想的二极管来分析, 即不考虑正向压降的影响。

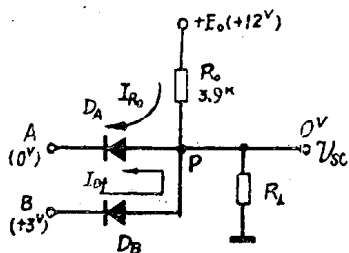


图 13.4.2 对前级影响最大的情况

先看图13.4.2“与”门电路对前一级的影响。我们知道, 当 $V_A = 0V$ 、 $V_B = +3V$ 时, V_p 被箝位在 $0V$ 。这时, 负载 R_L 的电流 $I_{L0} \approx 0$; 又由于二极管 D_B 截止, 所以流过电阻 R_0 的电流 I_{R0} 全部经过 D_A 流入前级, 并且二极管 D_B 的反向电流 I_{BF} 也经

过 D_A 流入前级。对与 A 相接的前一级来说, 这是最不利的情况 (如果 $V_A = V_B = 0V$, D_A 、 D_B 都导通, 则 I_{R0} 平均分配地流过 D_A 和 D_B 。这样对与 A 相接的前级来说, 负载就减轻到一半)。我们把这个经过二极管 D_A 流向前一级的最大电流叫做 I_{srn} , 则:

$$I_{srn} = I_{R0} + I_{Bf} = \frac{E_0}{R_0} + I_{Bf} \approx \frac{E_0}{R_0} \quad (13.4.1)$$

例如图 13.4.2 中, $I_{srn} = 3.1mA$ 。 I_{srn} 越大, 对前面一级的影响就越大。所以 I_{srn} 应该小一些, 也就是要求 R_0 大一些, E_0 小一些。

再看后面的负载对这个与门的要求。如图 13.4.3 所示, 当 $V_A = V_B = +3V$ 时, $V_P = +3V$ 。如果我们用 V_g 表示高电位, 此时负载电流为 $I_{sc} = \frac{V_{sc}}{R_L} = \frac{V_g}{R_L}$, 流过 R_0 的电流为:

$$I_{R0} = I_A + I_B + I_{sc} = \frac{E_0 - V_g}{R_0}$$

式中 I_A 、 I_B 为流入二极管 D_A 、 D_B 的电流。由于 E_0 和 R_0 一经确定后是不会变的, 高电平 V_g 在机器设计时也是预先规定好的, 因此 I_{R0} 是一常数。

减小负载电阻 R_L , 则 I_{sc} 增加, 而 I_{R0} 不变, 所以流过二极管的电流 I_A 和 I_B 必然会减小。这是因为

$$I_A + I_B = I_{R0} - I_{sc}$$

此外, 从上式可以看到: 当 I_{sc} 增加到 $I_{sc} = I_{R0}$ 时, 则 $I_A + I_B = 0$ 。也就是说, 这时 I_{R0} 全部流入负载 R_L , 而二极管 D_A 和 D_B 中无电流。如果把负载 R_L 进一步减小, 则二极管 D_A 和 D_B 就会转

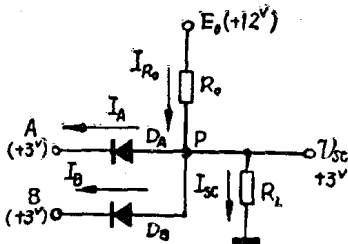


图 13.4.3 负载电流最大的情况

入截止状态，失去箝位作用， P 点电位就会下降，门电路输出电压就低于 V_g 。所以门电路的负载电阻 R_L 不能太小。

如果负载电流的最大允许值为 I_{scm} ，则：

$$I_{scm} = I_{R0} = \frac{E_0 - V_g}{R_0} \quad (13.4.2)$$

从上式可知，如果要增大 I_{scm} ，就应该使 E_0 增大， R_0 减小。

设计一个二极管“与”门电路，常希望对前级电路的影响小，对后级带负载能力强，也就是希望最大输入电流 $I_{im} = \frac{E_0}{R_0}$ 越小越好，那么 E_0 应当尽可能减小， R_0 尽可能增大；另一方面又希望提供尽可能大的最大负载电流 I_{scm} ，那么 E_0 应该尽可能大， R_0 尽可能小。可见输入和输出两方面对 E_0 和 R_0 的要求是相互矛盾的。通常选 $E_0 = (4 \sim 8)V_g$ ， V_g 为输入信号的高电位，也就是整机的逻辑高电平（例如： $V_g = +3V$ ）。

E_0 确定之后，可根据整机对“与”门要求的输入和输出电流来选择一个合适的 R_0 值。

〔例〕： $V_g = +3V$ ，最大负载电流 $I_{scm} = 2mA$

选 $E_0 = 4V_g = 12V$ 。

根据式(13.4.2)可得：

$$R_0 \leq \frac{E_0 - V_g}{I_{scm}} = \frac{12 - 3}{2} = 4.5K\Omega$$

可选 $R_0 = 3.9K$ （标称系列值）。

必须指出， R_0 的选择除了根据最大负载电流和流入前级的电流的要求之外，还应考虑门电路带电容负载的情况。图13.4.4中 C_L 包括接线的分布电容和后级的负载电容。当 B 输入为高电位，而 A 输入由 $0V$ 跳变到 $+3V$ 时，我们希望 V_{sc} 也立刻变成 $+3V$ ，如图13.4.4中虚线所示。但由于 C_L 上的电压不能跳变，对它充电需要一个过程， V_{sc} 只能逐渐上升。 C_L 越大，上升越