

何小艇 编著

MAICHONG
DIANLU

脉冲电路

浙江大学出版社

脉冲电路

何小艇 编

浙江大学出版社

(浙)新登字10号

内 容 简 介

《脉冲电路》按照国家教委有关本课程的教学基本要求编写而成。全书着重于脉冲电路的基础,学习分析脉冲电路的基本方法。在内容取舍上注意以集成电路构成的脉冲电路为主,并注意了实用性。

本书可供通信、雷达、仪器仪表、工业电子技术等专业作为本科生教材,也可供有关专业人员参考。

脉 冲 电 路

傅小艇 编

责任编辑 陈子饶

浙江大学出版社出版
浙江大学印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

850×1168毫米 1/32 印张: 4.3125 字数: 111千字
1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数: 0001—3000

ISBN 7-308-00796-0

TN·024 定价: 1.60元

前 言

脉冲与数字电路课程是电子、通信等专业的主要技术基础课。当前国内数字电路教材较多，而配套使用的脉冲电路教材却很少，本书就是为了填补这个缺口而编写的。本书可供16~20学时的教学使用。

编者根据多年教学实践经验，在编写本书时特别强调脉冲电路的基础——开关电路的分析，强调学生学会分析脉冲电路的基本方法。而一些对于初学者掌握基本方法并不重要的部分，例如开关惰性及分布参数影响等内容，则采用打*号的方法放在基础之后，作为进一步掌握基础知识，扩展学生知识面的内容。这样安排虽在内容体系上有所打乱，但对学生掌握基本方法大有好处。本书也编入了TTL集成逻辑门构成的脉冲产生电路一章，虽然这一章通常已被收入在数字电路教材中，但为了完整性，本书仍将这部分内容收编于最后。本书各章都附有少而精的习题供选用。

编者希望广大读者在使用本书之后能给以宝贵的批评和指正。

浙江大学

何小艇

1991年4月

目 录

绪 论	1
第一章 脉冲电路基础	4
第一节 线性电路暂态分析	4
一、一阶电路的分析方法	5
二、高阶电路的分析方法	9
第二节 晶体管开关	10
一、晶体二极管稳态开关特性及其等效电路	10
二、晶体三极管稳态开关特性及其等效电路	14
三、MOS晶体管稳态开关特性及其等效电路	20
第三节 开关电路的计算	26
一、晶体管开关的输入、输出等效电路	26
二、开关电路计算举例	29
习 题	40
第二章 脉冲波形变换与形成电路	46
第一节 限幅器	46
一、二极管限幅器	46
二、三极管限幅器	49
三、限幅器对耦合电路的影响	53
第二节 钳位器	57
一、二极管钳位器	58
二、三极管基极钳位作用	61
第三节 微分电路	62
第四节 锯齿电压波形成电路	64
一、简单锯齿电压波形成电路	65
二、*恒流源锯齿电压波形成电路	67
三、密勒积分电路	69
第五节 *限制脉冲电路速度的各种因素及分析方法	72
一、晶体二极管瞬态开关特性	73
二、晶体三极管瞬态开关特性	75

三、分布电容的影响	80
四、开关方波边沿的影响	81
五、实际情况分析举例	82
习题	84
第三章 脉冲波形产生电路	88
第一节 集基耦合双稳触发电路	88
一、电路工作原理	89
二、触发方法	92
第二节 集基耦合单稳触发电路	94
一、电路工作原理	94
二、参数计算	97
第三节 多谐振荡器	98
一、电路工作原理	99
二、参数计算	101
第四节 集成运算放大器构成的脉冲产生电路	103
一、集成运放构成的单稳触发电路	104
二、集成运放构成的多谐振荡器	105
三、集成运放构成的施密特触发电路	107
习题	109
第四章 TTL集成逻辑门构成的脉冲产生电路	112
第一节 TTL集成逻辑门的输入、输出特性	112
一、输入、输出等效电路	112
二、开门电阻与关门电阻	114
三、阈值电平	115
第二节 TTL集成逻辑门构成的单稳触发电路	115
一、微分型单稳触发电路	115
二、积分型单稳触发电路	119
第三节 TTL集成逻辑门构成的多谐振荡器	120
一、环形多谐振荡器	120
二、对称微分型多谐振荡器	123
三、石英晶体多谐振荡器	125
第四节 TTL集成逻辑门构成的施密特触发电路	127
习题	130

绪 论

在学习脉冲电路以前，首先要介绍脉冲信号，脉冲电路。

就电信号来讲，脉冲信号是指在短暂时间内作用于电路的电压或电流。常见的脉冲信号波形如图 1 所示。脉冲电路就是变换、

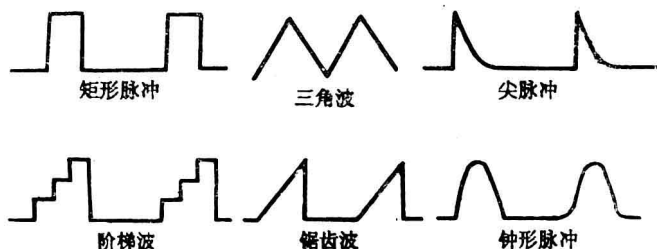


图1 常见的脉冲信号波形

形成或产生脉冲波形的电路。脉冲电路对脉冲波形有严格的要求，不仅考虑脉冲的有无，而且要考虑脉冲的幅度、宽度以及整个波形（特别是上升、下降沿）的变化情况。为了对脉冲信号有一个比较具体的概念，现以最常见的矩形脉冲电压波为例，来说明脉冲波形的的主要参数，参见图 2 所示。

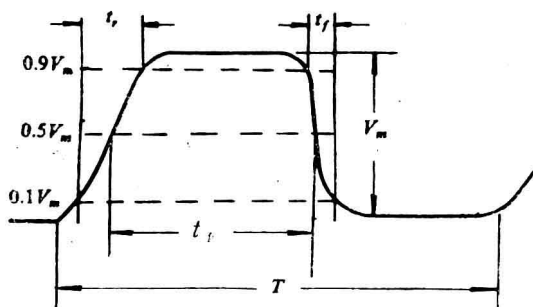


图2 矩形脉冲的特性参数

图中 V_m 是脉冲电压变化幅值,称为脉冲幅度; t_r 为脉冲前沿上升时间,即从前沿 $0.1V_m$ 上升至 $0.9V_m$ 所需时间; t_f 为脉冲后沿下降时间,即从后沿的 $0.9V_m$ 下降至 $0.1V_m$ 所需时间; t_p 是脉冲宽度,即脉冲前沿的 $0.5V_m$ 到脉冲后沿 $0.5V_m$ 处的持续时间; T 为脉冲重复周期,即周期性重复脉冲序列中,两相邻脉冲重复出现所间隔的时间; f 是脉冲重复频率, $f = \frac{1}{T}$,表示每秒脉冲重复出现的次数; t_p/T 是占空比,即脉宽与脉冲周期的比值。

常用脉冲电路的各个参数范围大致如下: $V_m-0.1\sim 100V$,
 $t_r-1\mu s\sim 1ns$, $t_f-1\mu s\sim 1ns$, $t_p-1ms\sim 0.1\mu s$, $T-10ms\sim 10ns$, $f-100Hz\sim 100MHz$ 。本课程介绍的脉冲电路是小功率中速电路,脉冲幅度较小、速度较慢(边沿较长),各个参数处于下限范围。

对图2的波形作进一步地观察,可以发现脉冲波形实际上是由若干段RC电路暂态过程所合成的。RC充放电电路如图3(a)所示。假设开关K一直处于“3”端, $v_c=0$ 。在 $t=0$ 时,开关扳向“1”端,此时电压源 E 经过电阻 R_s 和 R_1 对 C 充电,充电时间常数 $\tau_1=(R_s+R_1)C$, v_c 以指数律上升。在 $t=t_1$ 时,开关K又扳向“2”端,此时电容 C 将通过 R_1 和 R_2 放电。放电时间常数 $\tau_2=(R_1+R_2)C$, v_c 则以指数律下降。假设 $R_2\gg R_s$,则 v_c 下降的速度比上升

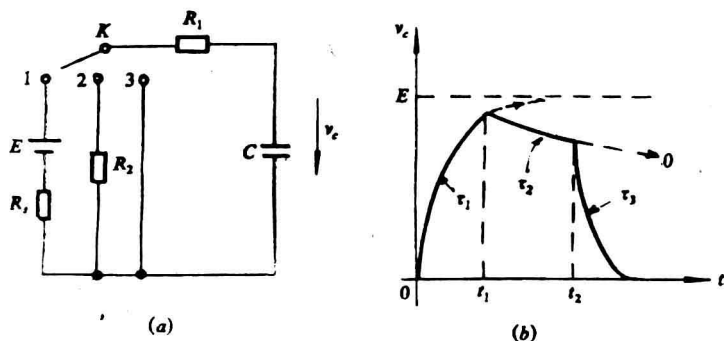


图3 (a)RC充放电电路 (b) v_c 波形

慢。在 $t=t_2$ 时，开关 K 又扳向“3”端并停在“3”端，此时电容 C 的放电时间常数变为 $\tau_3 = R_1 C$ ， v_C 很快下降至零。可以画出 v_C 波形如图3(b)所示。将图2与图3(b)相对比，可以发现它们是很相似的。由此得结论：脉冲电路的基本结构是开关加惰性系统，如图4所示。其中开关是电子开关，电路原理上等效为图3(a)的开关 K ，惰性系统是带有储能元件（ L 或 C ）的线性电路，如图3(a)中的 RC 电路。电子开关控制惰性系统充放电，迫使电路产生暂态过程，从而得到所需要的脉冲波形。因此脉冲电路的基础就是两部分：线性电路的暂态分析；电子开关的计算。不同的脉冲电路就是这两部分的不同组合，这是脉冲电路基础。

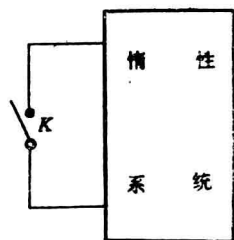


图4 脉冲电路基本结构

第一章 脉冲电路基础

第一节 线性电路暂态分析

带有储能元件的线性电路的暂态分析是分析、计算脉冲电路的基础。储能元件可以是电容 C 、电感 L 、或是两者共存，也可以利用传输线（同轴线、双导线传输线、微带线、仿真线）作为储能元件。一个线性电路可能不止包含一个储能元件，也可能不止包含一种储能元件，而且控制储能元件充放电的开关信号也有阶跃变化与非阶跃变化之分。根据线性电路的结构以及开关信号的条件，线性电路的暂态分析方法不外乎三种：微分方程，拉氏变换，卷积。在《电路分析基础》和《信号与系统》两门课程中都作过详细介绍并作过大量习题，在这里不准备简单的加以重复，而准备根据工程应用的特点，采取由简到繁逐步深入的方法。在分析中着重于基本概念和基本计算。

我们知道实际问题是复杂的，电路中不单单有外接的储能元件，而且有各种分布参数，如分布电容和引线电感，而且开关信号也永远不会是阶跃变化的。如果严格按照实际电路结构及开关信号进行计算，其结构将会是相当复杂且很难掌握电路的基本工作特点。所以我们将按照实际工作特点，首先分析计算基本电路的基本性能，然后再根据需要及实际情况加以修正，从而得到接近于实际的结果。这种由简到繁逐步深入的方法有助于人们掌握电路的基本原理和性能，学会分析实际问题及解决实际问题的能力。在这一节中将重点复习最常用的最基本的方法——阶跃开关信号作用下，一阶电路暂态过程的计算方法，即三要素

法；同时给出高阶电路及非阶跃开关信号作用下暂态过程计算的原则和特点。

一、一阶电路的分析方法

所谓一阶电路就是电路中只有一个独立的储能元件的电路。常用的一阶电路有 RC 电路和 RL 电路。而控制电路的开关信号有阶跃开关信号和非阶跃开关信号之分，因此一阶电路的分析方法亦不同。下面首先介绍三要素法。

1. 三要素法——阶跃开关信号时一阶电路的分析方法

以图1-1(a)所示 RC 电路为例。开关 K 位于“2”端很久，电路已经稳定， $v_C = 0$ 。 $t = 0$ 时，开关 K 扳向“1”端，相当于在 RC 电路输入端加入一个阶跃电压 E ，电压源 E 经电阻 R 对电容 C 充电。根据图1-1(a)中规定的电压、电流正方向，可列出方程

$$\begin{aligned} E &= iR + v_C \\ i &= C \frac{dv_C}{dt} \end{aligned} \tag{1-1}$$

计算 RC 电路暂态过程的一阶常微分方程为

$$RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = E \tag{1-2}$$

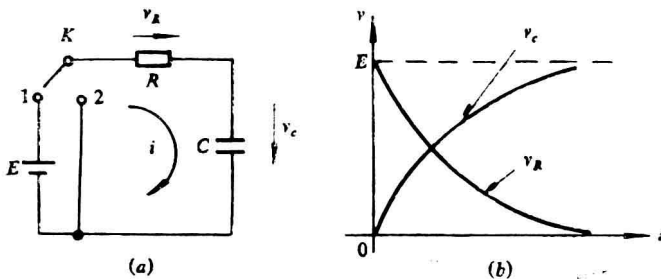


图1-1 (a) RC 电路 (b) 电压波形

解出

$$v_C = E + Ae^{-t/\tau} \quad (\tau = RC) \quad (1-3)$$

将(1-3)式改写成

$$v_C = v_C(\infty) + [v_C(0^+) - v_C(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1-4)$$

待定常数 $v_C(0^+)$ 可利用初值定理来确定。根据开关扳动时电容电压不能突变的原则，可以得出 $t=0^+$ 时、 $v_C(0^+) = v_C(0^-) = 0$ 。根据电路结构可知 $t=\infty$ 时，电容 C 将被充电到 $v_C = E$ ，即 $t=\infty$ 时 $v_C(\infty) = E$ 。将 $v_C(0^+)$ 及 $v_C(\infty)$ 代入(1-4)式，得

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-5)$$

事实上(1-4)式是阶跃开关信号作用下，一阶电路暂态分析的通解。它不单适用于 RC 电路，也适用于 RL 电路。它不单可用来描述电压暂态过程，也可以描述电流暂态过程。从而可把(1-4)式改写成通用表达式：

$$x(t) = x(\infty) + [x(0^+) - x(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1-6)$$

其中

$x(0^+)$ ——起始值；

$x(\infty)$ ——趋向值；

τ ——时间常数。

今后计算阶跃开关信号作用下一阶电路的暂态过程时，可以根据电路情况求出 $x(0^+)$ 、 $x(\infty)$ 以及 τ 这三个要素，并把它们代入(1-6)式，即可直接写出电压（电流）变化的表达式。我们把这种方法称为三要素法。

下面简单介绍一下三要素的计算方法：

(1) 时间常数 τ

计算电路时间常数 τ 时，应将电压源短路（内阻保留）、电流源开路，利用简单的串并联方法将电路化简成单一电阻电容电

路或单一电阻电感电路。此时，电路的时间常数

$$\tau = RC$$

$$\text{或} \quad \tau = L/R \quad (1-7)$$

(2) 趋向值 $x(\infty)$

趋向值表示电路达到稳定时某点电压（电流）的数值。电路达到稳定，即暂态过程已经结束，此时电容、电感不再充放电。所以在计算稳态值时应将电路中的电容开路、电感短路（内阻保留），然后计算待求的电压（电流）值。

(3) 起始值 $x(0^+)$

起始值表示的是在开关扳动后瞬间某点电压（电流）的数值。计算起始值时必须利用初值定理：开关扳动时电容电压不能突变；开关扳动时电感电流不能突变的原则。即

$$v_C(0^+) = v_C(0^-)$$

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) \quad (1-8)$$

首先应计算出开关扳动前的 $v_C(0^-)$ 、 $i_L(0^-)$ ，它们可能是开关扳动前的稳态值，也可能是前一个暂态过程的终止值，如图3(b)中的 $v_C(t_1^-)$ 或 $v_C(t_2^-)$ 。

下面利用三要素法计算图1-1(a)的 v_R 波形：当 $t=0^+$ 时， $v_C(0^+) = v_C(0^-) = 0$ ，所以 $i(0^+) = \frac{E}{R}$ ， $v_R(0^+) = i(0^+)R = E$ ；而 $t=\infty$ 时 $v_C(\infty) = E$ ，则 $i(\infty) = 0$ ， $v_R(\infty) = 0$ 。 $\tau = RC$ ，可以得

$$v_R(t) = 0 + (E - 0)e^{-t/\tau} = Ee^{-t/\tau} \quad (1-9)$$

v_C 、 v_R 波形如图1-1(b)所示。

(1-6)式表明，在阶跃开关信号作用下，一阶电路的暂态特性决定于电路的时间常数。为了对暂态过程和时间常数的关系有比较清晰的概念，下面将举一些数字例子。以图1-1(a)中 v_C 、 v_R 为例，设开关K扳到“1”端的瞬间的 v_R 值为100， v_C 为0，随后

v_C 和 v_R 与时间的关系为:

t	0	0.1τ	τ	2.3τ	3τ	5τ
v_C	0	10	63	90	95	99.3
v_R	100	90	37	10	5	0.7

根据脉冲前沿上升时间 t_r 和脉冲后沿下降时间 t_f 的定义, 脉冲边沿是由 $0.1V_m$ 变化到 $0.9V_m$ 所需时间, 等于 $2.3\tau - 0.1\tau = 2.2\tau$ 。由(1-6)式还可以看出, 只有时间等于无穷大时暂态过程才结束。事实上, 惰性元件的电压(电容)或电流(电感)达到稳定值的95%或99.3%时就可以认为暂态过程结束, 电路达到稳定状态。因此暂态持续期等于 $(3\sim 5)\tau$ 。

三要素法是在阶跃开关信号作用条件下, 分析计算一阶电路暂态过程的最方便的方法, 也是分析计算脉冲电路波形的基本方法, 应该熟练掌握它。

2. 非阶跃开关信号时一阶电路的分析方法

在非阶跃开关信号作用下, 一阶电路的解就不再具有(1-6)式的形式, 因此三要素法也就不再适用。应该采用拉氏变换或卷积来计算电路的暂态过程。有人认为客观世界上永远不会存在阶跃信号, 因此三要素法也永远没有使用的场合。我们应该从处理实际问题的角度来看待这个问题。实际上, 只要开关信号的边沿远小于电路的时间常数, 我们就可以把它看作阶跃信号, 从而使用三要素法来计算电路的暂态过程。计算出来的结果误差是很小的, 在工程允许范围以内这种近似是合理的。这是考虑实际工程运用而采用的近似方法, 它给分析和计算带来极大方便, 而且有利于了解事物的主要矛盾, 值得采用。

二、高阶电路的分析方法

所谓高阶电路就是电路中含有二个以上的独立的储能元件的电路。所谓二个以上独立的储能元件就是经过简单的串并联方法无法将电路化简成单一电阻电容电路，或单一电阻电感电路，此时的电路就是高阶电路。图 1-2 给出了四个电路，其中图 (a)、(b)、(d) 都是一阶电路，各电路的时间常数分别是 $\tau_a = (R_1 +$

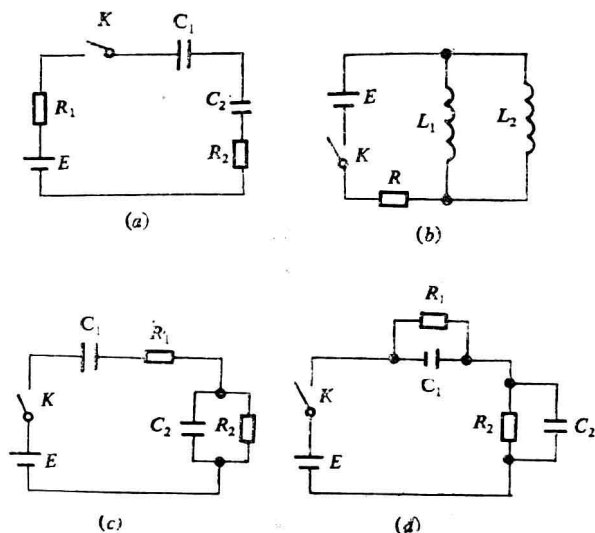


图1-2 各种RC电路

$R_2) \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$, $\tau_b = \frac{L_1 L_2}{(L_1 + L_2) R}$, $\tau_d = (C_1 + C_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 。而图

(c) 则是二阶电路，其解不具有(1-6)式的形式，因此二阶电路没有统一的时间常数，也不能用三要素法进行计算。分析计算高阶电路的暂态过程应采用拉氏变换或卷积。此外二阶电路还可能是两种不同性质的储能元件共存的电路，如 $R-L-C$ 电路。有关 $R-L-C$ 电路的暂态分析可参阅《电路分析基础》有关章节，这里不再重复。

第二节 晶体管开关

我们已经知道脉冲电路的基本结构是开关加惰性系统。这个开关不可能是普通的机械开关，它们大多是晶体管开关：晶体二极管开关、晶体三极管开关以及MOS晶体管开关。晶体管开关的作用是把电路接通和断开：接通时开关呈现很小的电阻，最好接近于短路；断开则要求开关呈现很大的电阻，最好是开路。因此就要求晶体管开关工作在两个极端状态：饱和导电状态（以获得尽量小的导通电阻）；截止状态（以获得最大的电阻）。因此工作于开关状态的晶体管都是大信号运用，它与小信号放大状态不同。所以适用于小信号放大状态的交流等效电路也不能用了。为此，首先需要讨论晶体管的开关特性以及开关运用条件下的晶体管等效电路。由于脉冲电路总是有两种工作状态：相对稳定状态（开关稳定在某个端点时的状态）和瞬变状态（开关突然扳动时的状态）。所以晶体管开关也就对应地有两种工作状态：相对稳定状态和瞬变状态。本章中首先介绍晶体管开关的稳定开关特性。晶体管开关的暂态开关特性将在第二章中介绍。

一、晶体二极管稳态开关特性及其等效电路

1. 晶体二极管稳态开关特性

为了研究晶体二极管的稳态开关特性，首先要了解它的静态伏安特性。图1-3示出了结型硅二极管的典型伏安特性曲线。由曲线可看出：

(1) 正向偏置($v_D > 0$)时，存在死区和导电区：

当正向电压小于 e_d ($0 < v_D < e_d$)时，二极管电流极小，约在几纳安到几十微安之间，这时可近似认为二极管处于截止状态。因此，通常把这个区域称为死区。只有当正向电压大于 e_d 以后，

二极管电流才随着端电压的增加而显著加大，进入导电区。 e_d 称为二极管的起始电压，对于硅二极管 $e_d = 0.5 \sim 0.6\text{V}$ ，对于锗二极管 e_d 约为 0.2V 。当硅二极管的正向电压大于 0.7V 以后，特性曲线接近于直线，二极管良好导通。

(2) 反向偏置 ($v_D < 0$) 时，存在截止区和击穿区：

当反向电压的绝对值小于击穿电压 V_z 的绝对值 (即 $V_z < v_D < 0$) 时，二极管电流极小，这个小电流称为反向饱和电流 I_0 。这时二极管工作于截止区。

当反向电压达到 V_z 时，二极管被反向击穿，产生很大的反向电流，而工作于击穿区。除了稳压管外，一般作开关用的二极管均应使 $v_D > V_z$ ，以避免击穿区。

由以上分析可以得到二极管的开关条件：

$v_D < e_d$ 时二极管截止；若 $v_D < 0$ (反偏)，则可靠截止。

$v_D > e_d$ 时二极管导通；若 $v_D \geq 0.7\text{V}$ (硅管) 或 $v_D \geq 0.3\text{V}$ (锗管)，则良好导通。

2. 晶体二极管开关等效电路

由于晶体二极管用作开关时，总是处于大信号运用状态，因此可将其伏安特性曲线折线化近似，如图 1-4 所示。其中：导电区的特性曲线近似成与横轴交点为 e_d 、斜率为 $1/R_f$ 的一段直线， R_f 称为二极管动态内阻，一般为几~几十欧姆；死区的特性曲线与横轴重合；截止区的特性曲线为一根水平直线，与纵轴的交点

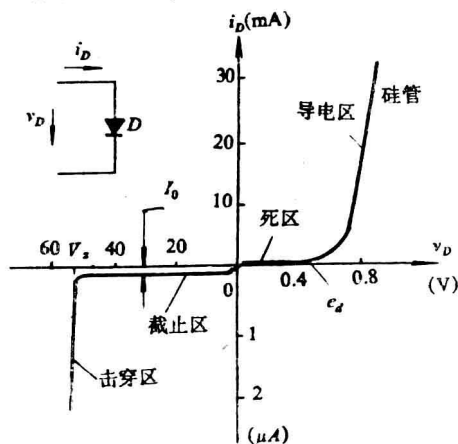


图 1-3 硅二极管伏安特性曲线