

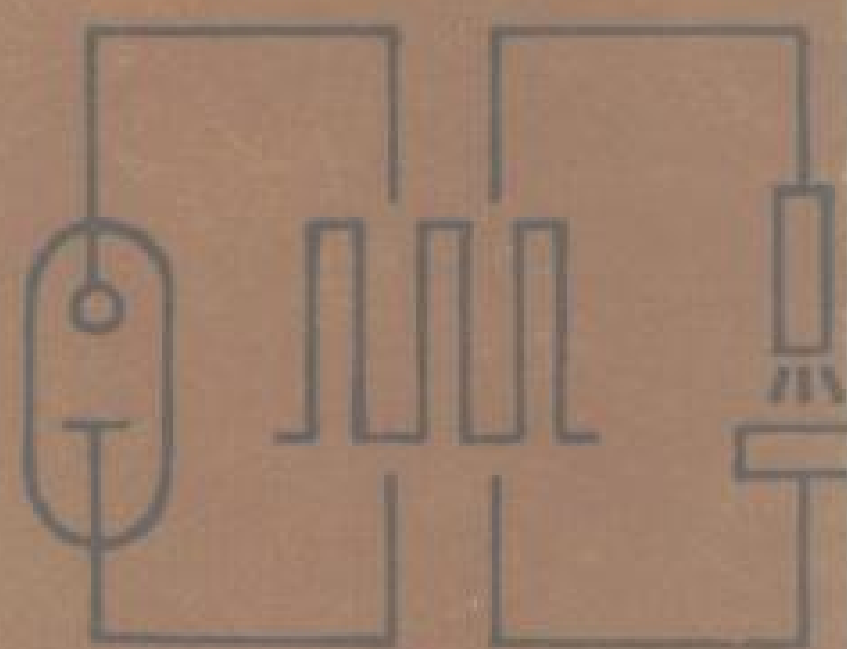


电力电子技术丛书

脉冲电镀和脉冲焊电源

张立 主编

机械工业出版社



DIANLI DIANZI JISHU CONGSHU

电力电子技术丛书

脉冲电镀和脉冲焊电源

张立 主编

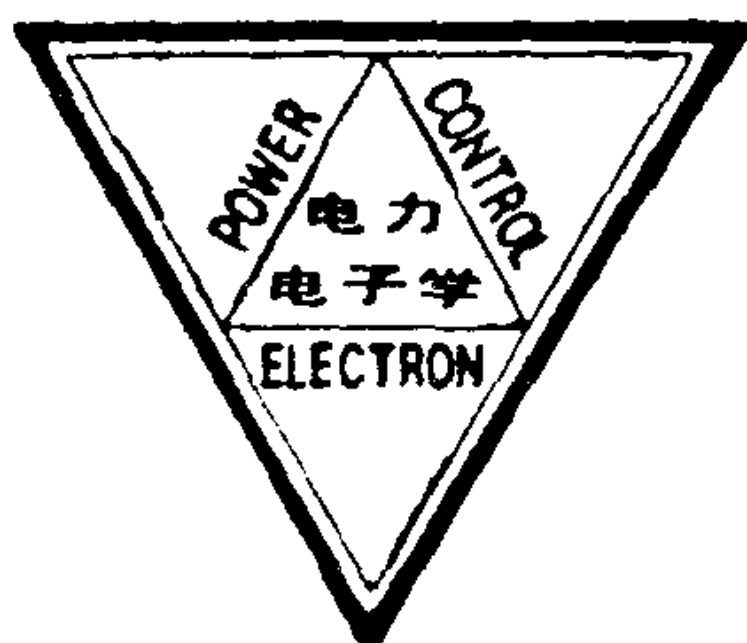


机械工业出版社

脉冲镀和脉冲焊是近十年来发展较快的新工艺、新技术、国内外都十分重视。其中，设计制造各种大功率脉冲电源是推广应用这些新技术的关键。

本书是《电力电子技术丛书》之一，比较详细地介绍了各种类型脉冲镀和脉冲焊电源的工作原理、设计方法及其应用技术。书中涉及的大功率脉冲电源技术不仅适用于电镀和电焊领域，而且，读者可以举一反三应用相同的原理，设计制造适用于脉冲电机、激光、高能物理、医疗仪器、除尘以及电火花加工等专用的脉冲电源设备。

本书适合于从事电镀、电焊与电子设备的设计制造和使用维护人员阅读、也可供大专院校有关专业的师生参考。



脉冲镀和脉冲焊电源

张立 主编

*

责任编辑：孙流芳 牛新国

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张14¹/₄·插页1·字数378千字

1988年6月重庆第一版·1988年6月重庆第一次印刷

印数 0.001—3.100·定价：4.30元

*

科技新书目：167—011

ISBN 7-111-00532-5/TM·80

出版者的话

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用的技术，也是融合“电力”、“电子”和“控制”于一体的技术。由于电力半导体器件具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用可靠等优点，它已广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等部门，成为节能最有成效的技术之一。

为了普及与推广电力电子技术，大力促进我国国民经济各部门的发展，在中国电工技术学会电力电子学会组织下，我们决定出版这套《电力电子技术丛书》。

这套丛书包括《电力半导体器件原理》、《电力半导体电路原理》、《电力电子技术与节能》、《直流电动机晶闸管调速系统》、《交流电动机晶闸管调速系统》、《晶闸管斩波器》、《无功补偿与电力电子技术》、《家用电器与电力电子技术》、《晶闸管交流电力控制器》、《电力半导体直流稳定电源》、《不间断供电系统》、《脉冲电镀和脉冲焊电源》等，将陆续出版。

电力电子学会及本丛书编委会对丛书的选题、组稿、审定稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对编审稿工作给予了热忱关怀与帮助，在此表示深切的谢意。

机械工业出版社

编委会成员

主任委员 顾廉楚

副主任委员 张明勋 苏文成 张为佐

陈守良 严蕊琪

委员（按姓氏笔划序）

卞敬明 孙流芳 李佑持 沈来仪

张立 张永生 张铁忠 周胜家

秦祖荫 徐传骧

前 言

近十年来，脉冲镀和脉冲焊技术发展很快，在许多场合这些技术革新了传统的直流电镀和直流电焊工艺，带来了极其可观的经济效益和社会效益。目前，脉冲镀和脉冲焊技术在国内均受到普遍重视，但是大功率脉冲电源仍跟不上发展的需要，严重影响了脉冲镀和脉冲焊技术的发展和推广。正是为了促进大功率脉冲电源技术的发展，我们以脉冲镀与脉冲焊电源为主要内容，总结了我国这方面的经验，也吸取了国外的有关新技术，编写了此书。就加工工艺而言，脉冲镀与脉冲焊有许多不同之处，但在电源技术上却有许多共同之点，基于这一思想，我们把这两种电源技术编入同一书中，读者可以举一反三，开发其它新型的中、大功率脉冲电源。

本书由天津大学张立副教授主编，全书共分十二章，其中第一、五章由程玉正工程师编写，第二章由张立副教授编写，第三章由林孔元副教授编写，第四章由邢汝祯工程师编写，第六、七、九、十二章由赵家瑞教授编写，第八章由赵家瑞教授与孙维善副教授合写。第十、十一章由孙仁德副教授编写。

本书由天津大学杨学浚教授主审。电力电子技术丛书编委会召开了审稿会对本书进行了认真的审查，参加审稿会的代表和天津大学向国朴副教授对书稿提出了许多宝贵意见，谨在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

一九八六年九月

目 录

第一章 大功率脉冲电源的一般问题	1
第一节 脉冲参数及其数学描述	1
一、脉冲的含义及其参数	1
二、脉冲的数学描述	3
第二节 谐波分析法在脉冲技术中的应用	9
第三节 平均值、方均根值及脉冲功率的计算	13
第四节 脉冲的测量	19
一、示波器测量法	19
二、电表测量法	23
第二章 脉冲电镀及其电源	28
第一节 脉冲电镀的基本原理	28
一、基本原理	28
二、脉冲电镀的理论分析	30
三、脉冲电镀的特点及其局限性	34
第二节 脉冲电镀电参数分析	37
一、电化学负荷的等效电路	37
二、电容效应	39
三、脉冲波形	42
第三节 脉冲电镀电源设计原则	46
一、脉冲电镀电源的分类	46
二、电流型与电压型脉冲电源	46
第四节 脉冲电镀的应用	54
一、脉冲电镀应用概况	54
二、脉冲电镀应用的典型实例	56
三、脉冲电镀的实验方法	64
四、脉冲电镀的展望	66
第三章 实验用脉冲电镀电源	68
第一节 设计原则	68
第二节 电路原理	72

一、恒电流恒电位的实现	72
二、脉冲控制功能的实现	74
三、矩形波-锯齿波脉冲信号的产生	75
四、波形综合功能的实现	77
第三节 PPS-5实验脉冲电镀电源	78
一、整机的构成	78
二、整机工作过程	80
三、整机电路说明	80
四、主要性能指标	84
第四节 实验用脉冲电镀电源的发展	85
第四章 功率脉冲电镀电源	87
第一节 GTO功率脉冲电镀电源的基本原理	89
一、控制电路工作原理	89
二、主电路工作原理	103
第二节 功率脉冲变压器	109
一、脉冲变压器的动态指标	109
二、脉冲变压器铁心的磁化曲线	109
三、脉冲变压器绕组匝数的基本公式	111
四、脉冲变压器等值电路分析	114
五、脉冲变压器的去磁绕组	120
第五章 大功率脉冲电镀电源	122
第一节 周期换向电源	122
一、周期换向电源概述	122
二、主电路及移相触发电路	124
三、逻辑切换与时间控制环节	130
第二节 交流不对称直流电镀铁电源	132
一、电镀工艺对电源的要求	132
二、单相电镀铁电源的工作原理	134
三、三相电镀铁电源的工作原理	138
第三节 特殊波形电源	142
一、特殊波形电源的特点	142
二、特殊波形电源的工作原理	143
第四节 正弦波调制整流电源	147

第六章 脉冲弧焊的特点及其对电源的要求	152
第一节 脉冲弧焊的特点	152
一、物理冶金特点.....	153
二、工艺特点.....	154
第二节 脉冲弧焊工艺参数	154
第三节 焊接电弧静特性及其对电源特性的要求	155
一、焊接电弧的静特性.....	155
二、电弧静特性对电源特性的要求.....	156
第四节 基值电流电源和脉冲电流电源的外特性选择	163
一、平-平和平-陡降特性的组合电源.....	163
二、陡降-平和陡降-陡降特性的组合电源.....	164
第五节 脉冲弧焊电源的分类	166
第六节 脉冲弧焊电源的应用	167
第七章 整流管脉冲弧焊电源	168
第一节 磁放大器整流弧焊电源	168
一、磁放大器式整流弧焊电源的组成.....	169
二、简单磁放大器原理.....	170
三、内反馈磁放大器.....	172
四、内桥内反馈磁放大器.....	173
五、磁放大器式脉冲弧焊电源脉冲电流的获得.....	175
第二节 磁放大器式三相不平衡的脉冲弧焊电源	176
一、基本结构.....	176
二、脉冲电压的产生.....	177
三、脉冲电流的产生.....	178
第三节 磁放大器式脉冲激磁电流型脉冲弧焊电源	179
一、晶体管式开关电路.....	181
二、晶闸管式开关电路.....	181
三、磁放大器式脉冲弧焊电源自动电网补偿问题.....	185
第四节 单相整流式脉冲弧焊电源	187
一、单相阻抗不平衡脉冲弧焊电源.....	187
二、双电源并联的脉冲弧焊电源.....	188
三、双电源差接并联的脉冲弧焊电源.....	189
四、单相整流式脉冲弧焊电源产品介绍.....	189

第八章 晶闸管脉冲弧焊电源	192
第一节 晶闸管直流斩波器型脉冲弧焊电源	192
一、单电源直流斩波器型脉冲弧焊电源.....	193
二、双电源直流斩波器型脉冲弧焊电源.....	202
三、两种晶闸管直流斩波器性能分析.....	211
第二节 晶闸管交流相控器型脉冲弧焊电源	214
一、基本情况.....	214
二、主电路.....	216
三、触发电路.....	217
四、控制电路.....	223
第三节 晶闸管逆变器型脉冲弧焊电源	229
一、逆变器型脉冲弧焊电源的主要优点.....	230
二、逆变器型脉冲弧焊电源的基本工作原理.....	231
三、几种常用的逆变器基本电路.....	232
四、逆变器型脉冲弧焊电源举例.....	234
第四节 晶闸管交流脉冲弧焊电源	238
一、基本情况.....	238
二、利用GA-600型手工氩弧焊机改装的交流脉冲弧焊电源.....	241
三、利用BX1-135手弧焊机改装的矩形波交流电源.....	243
第九章 晶体管脉冲弧焊电源	247
第一节 晶体管开关型脉冲弧焊电源	248
一、直流开关型脉冲弧焊电源.....	249
二、逆变器型脉冲弧焊电源.....	256
三、开关型晶体管焊接电源的效率问题.....	261
第二节 晶体管模拟型脉冲弧焊电源	265
一、函数发生器式模拟型脉冲弧焊电源.....	266
二、切换式模拟型脉冲弧焊电源.....	281
第三节 研制晶体管弧焊电源时要注意的几个问题	291
一、大功率晶体管的保护问题.....	291
二、均流问题.....	295
三、大功率晶体管的散热问题.....	298
四、系统自激振荡问题.....	300
五、脉冲频率问题.....	302

六、对整流电源的要求问题.....	304
第十章 工频脉冲电阻焊电源.....	306
第一节 电阻焊工艺对电源的要求.....	306
第二节 电阻焊电源的电参数和外特性.....	310
一、电源的电参数和外特性.....	310
二、控制角 α 对焊接电流的影响.....	316
三、控制角 α 对功率因数的影响.....	321
第三节 电阻焊电源的二次回路.....	323
一、二次回路的组成.....	323
二、二次回路电阻的计算.....	325
三、二次回路电抗的计算.....	331
四、焊接区的电阻.....	335
第四节 电阻焊的变压器.....	339
一、变压器的特点和结构.....	339
二、变压器的功率调节.....	341
三、单相变压器的设计计算.....	344
四、变压器的验算.....	352
第五节 接触器及控制电路.....	363
一、接触器.....	364
二、断续器.....	368
第十一章 非工频脉冲电阻焊电源.....	376
第一节 电容储能电源.....	376
一、电容储能电源主电路.....	378
二、放电变压器的计算.....	385
三、电容储能焊机的控制电路.....	387
第二节 二次整流电源.....	391
一、二次整流电源的主电路.....	391
二、整流元件的选择.....	400
三、变压器的设计特点.....	401
四、二次整流焊机的控制电路.....	404
第三节 一次侧整流电源.....	405
一、一次侧整流电源主电路的特点.....	405
二、变压器设计的特点.....	407

第十二章 微型计算机控制的脉冲焊电源	410
第一节 用 Z80 单板机控制的可获得不同外特性的弧焊电源	411
一、系统结构	411
二、系统的参数与放大倍数	415
三、系统的调节过程	417
第二节 用 Z80 单板机控制的可获得可控熔滴过渡的 CO₂ 焊电源	419
一、CO ₂ 焊接过程	419
二、系统结构	421
三、系统功能	422
四、软件	423
第三节 用 Z80 单板机控制的可获得不同脉冲波形的弧焊电源	424
一、基本电路方框图	424
二、脉冲焊接电流波形程序设计的基本思路	425
参考文献	444

第一章 大功率脉冲电源的一般问题

第一节 脉冲参数及其数学描述

在现代科学技术和工农业生产中，脉冲技术几乎已遍及国防、科研及生产各个领域。在雷达、计算机、通讯、逻辑控制、遥控遥测、高能物理、焊接、电化学等领域中，脉冲的应用越来越广，其重要性与日俱增。脉冲的产生、变换、放大及应用的研究，构成了脉冲技术的基础。

一、脉冲的含义及其参数

“脉冲”这个词，从字面上看，含有“短促”与“脉动”的意思，原来是在无线电技术中称呼作用时间很短而间隔时间又较长的电压或电流波形。随着脉冲技术的发展，大量新波形的出现与应用，把“脉冲”推广到时间并不很短的波形，现在甚至把一切非正弦波都称之为“脉冲”。图 1-1 列举出常见的几种脉冲波形。

脉冲，由于产生的原因与条件不同，应用的场所不同，波形的形状与规律往往是很复杂的。就波形而言，可能是规则的，也可能是不规则的。对规则的波形来

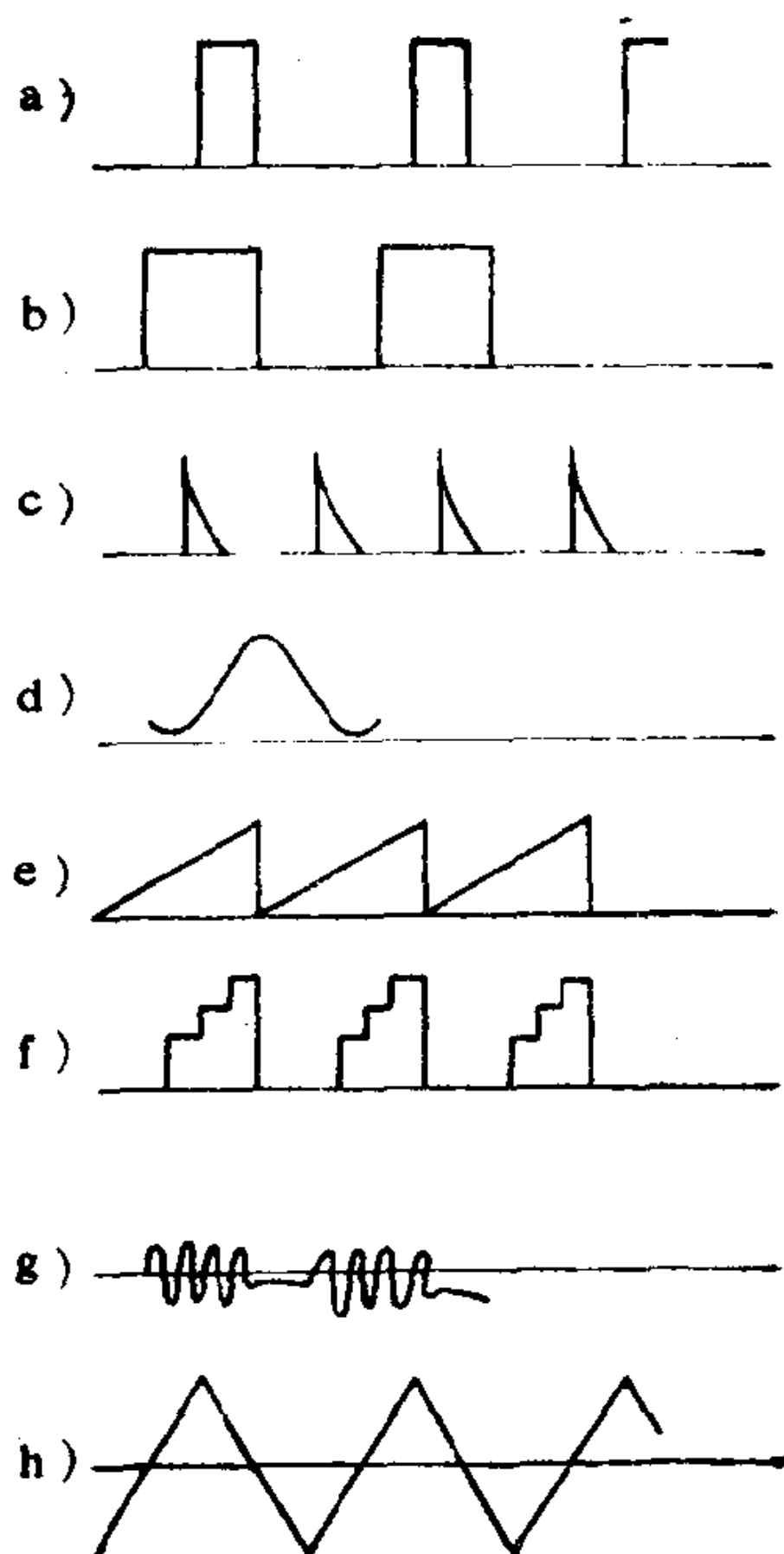


图 1-1 常见的几种脉冲波形

a)矩形波 b)方波 c)尖顶波 d)钟形波
e)锯齿波 f)阶梯波 g)断续正弦波 h)三角波

说，它可能是周期的，也可能是非周期的。周期脉冲，是指每隔一定时间 T ，按同一规律作重复变化的脉冲，例如图 1-1 所示的各种脉冲均属周期脉冲，本书所讨论的脉冲均指的是这一类脉冲。另外一些脉冲，例如干扰脉冲，它的波形、产生时刻及持续时间、重复性等，都是随机的，它们不属于本书讨论的范围。

脉冲电路，一般总是由电阻、电容、电感以及作为开关元件的晶体管、晶闸管等组成。在脉冲产生、转换与放大过程中，脉冲波形会发生多种多样的变化，但不管波形是如何的千差万别，也不管波形在线路中经过怎样复杂的千变万化，它们都有一个共同的特点，即每一个脉冲波形都是由若干个暂态过程所组成的。为了描述并研究这些波形、控制线路中的波形变化，特定义了一系列的脉冲参数。下面参照图 1-2 所示的典型矩形脉冲波形，介绍几个主要脉冲参数。

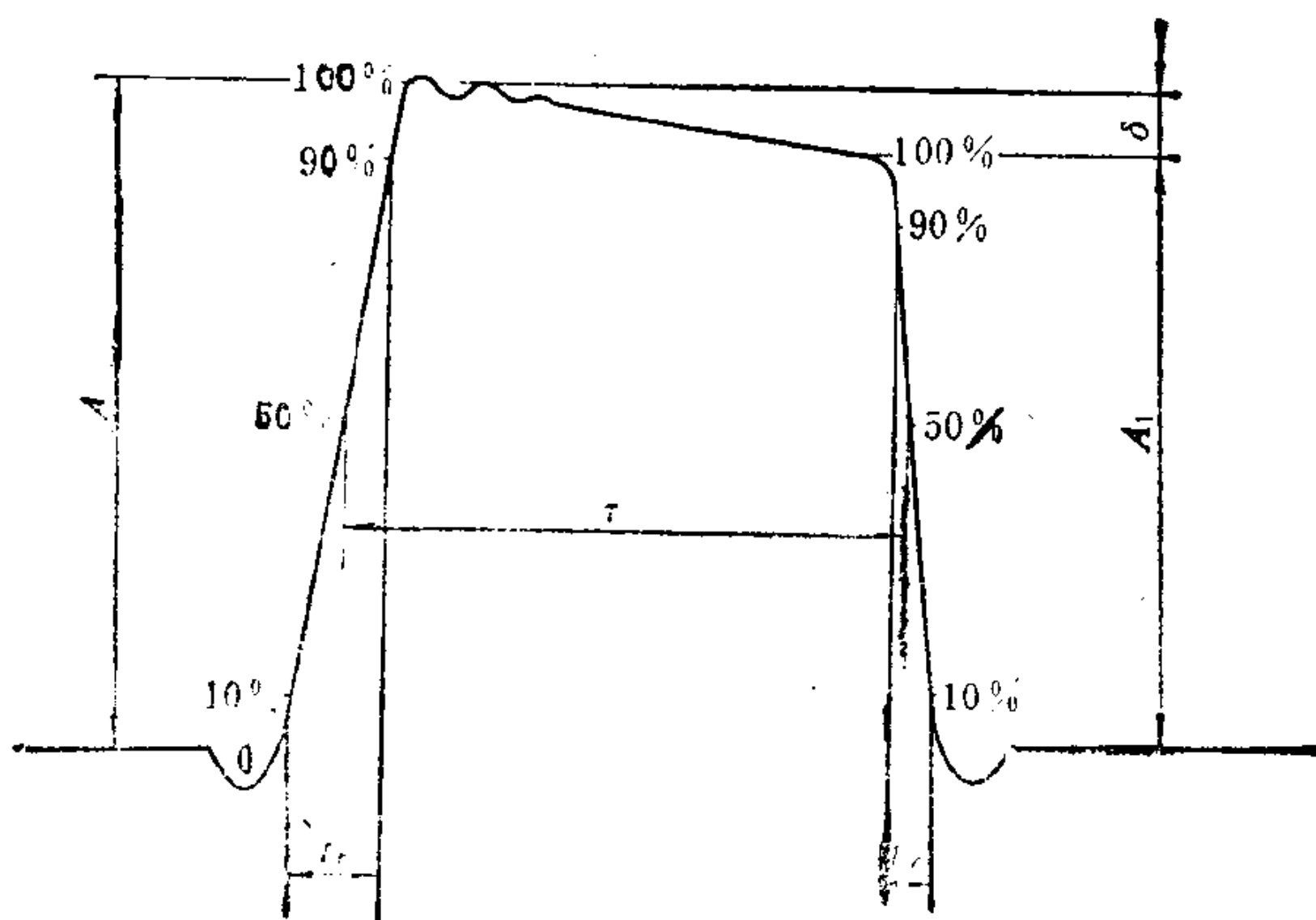


图 1-2 典型脉冲波形

脉冲幅度 A ：脉冲电压（或电流）从一种状态变化到另一种状态的跳变值，例如从低电平跳变到高电平或从高电平跳变到低电平时的跳变值。需要指出的是，在矩形脉冲的情形下，往往由于通过电路以后产生了顶降 δ ，于是后沿幅度 A_1 便小于 A ($A_1 = A - \delta$)。后沿幅度 A_1 对于定义脉冲宽度 τ 是一个有用的概念。

脉冲上升时间 t_r ：亦称为脉冲前沿。一个脉冲的前沿，是指其电压或电流从幅度 A 的 10% 上升到 90% 处所需要的时间。显然， t_r 越短，脉冲前沿上升得就越快，波形的前沿也就越陡。

脉冲下降时间 t_f ：亦称脉冲后沿。一个脉冲的后沿，是指其电压或电流从幅度 A_1 的 90% 下降到 10% 处所需要的时间。 t_f 越短，波形的后沿就下降得越快，后沿也就越陡。

脉冲宽度 τ ：是脉冲出现后所持续的时间。对大部分脉冲来说，由于顶部宽度与底部宽度不一样，甚至差别很大，因此很难作出严格的定义。对图 1-2 所示的矩形波，其定义较明确，它的宽度 τ 是指前沿幅度 A 的 50% 处与后沿幅度 A_1 的 50% 处两点间的时间。对图 1-1 中的尖脉冲、锯齿波等等，就很难定义了。因此，对顶部与底部差别大的波形，在定义宽度时应指出所对应的幅度是 50% A 处的宽度还是底部宽度。

顶降 δ ：对有平顶部分的脉冲波形，如方波、矩形波之类，其平顶部分的降落，通常以对其脉冲幅值的百分比来表示 ($\delta/A \times 100\%$)。

脉冲周期 T ：两个相邻脉冲重复出现所间隔的时间，如图 1-3 所示。周期 T 的倒数即为脉冲的重复频率，简称为频率 f 。 f 与 T 的关系为： $f=1/T$ 。

二、脉冲的数学描述

为了从理论与计算上去研究脉冲波形，经常要用到脉冲波形的函数表达式。对于规则的、周期的脉冲，振幅 A 与时间 t 之间存在着确定的函数关系

$$A=f(t)$$

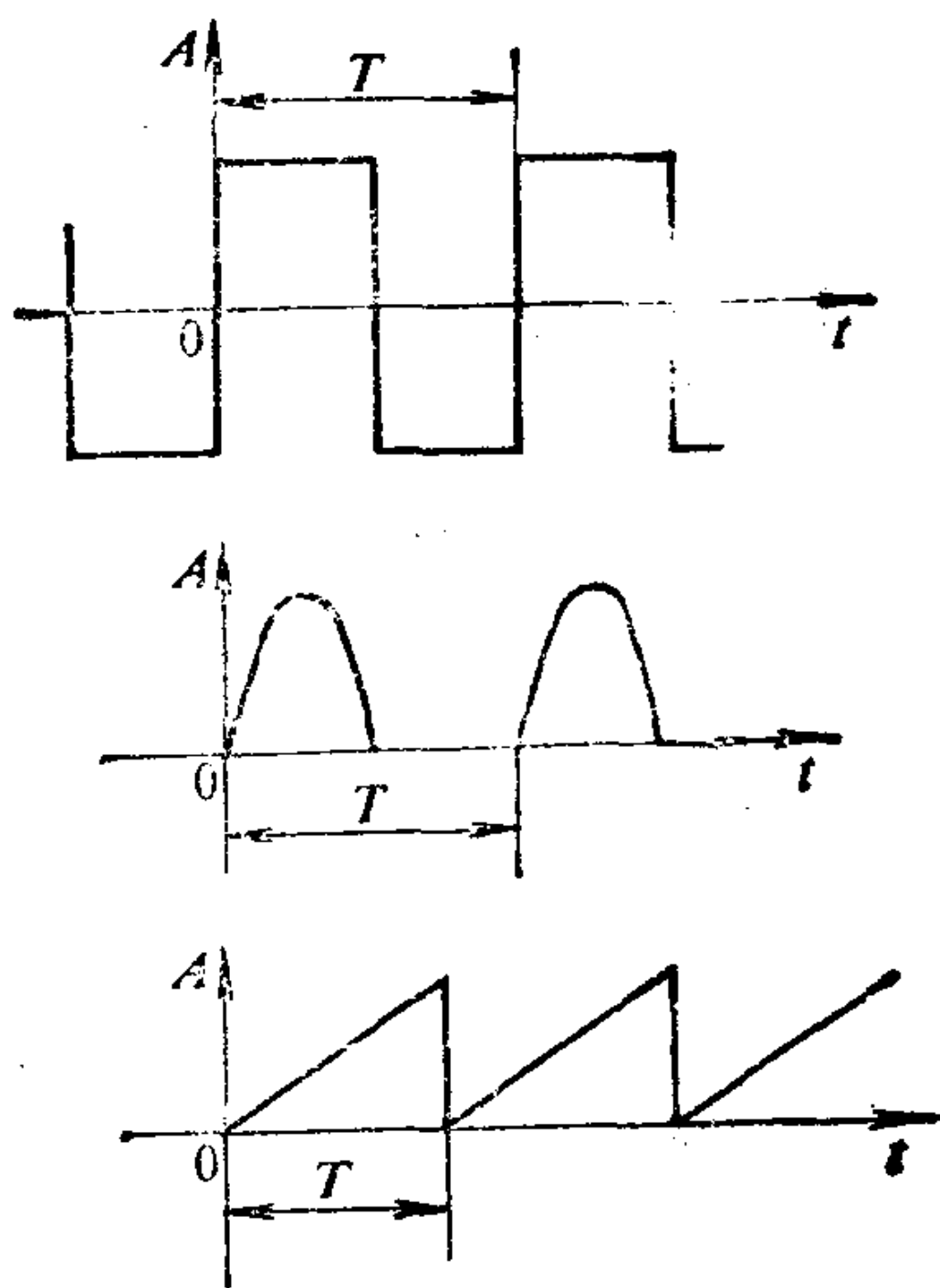


图 1-3 脉冲的周期

也就是说, 只要给出一个时间 t , 就有一个确定的 A 与之对应, 因此只要知道一种脉冲波形的函数表达式, 就可以方便地求出任一时刻的幅值 A 。波形的数学描述, 对于设计计算和实践, 都是非常重要的。

对一般的脉冲而言, 数学表达式是比较简单的。只要把幅值 A 与时间 t 的关系按 A 的变化分成一个个时间段写出来即可。例如, 对于图 1-4 的波形, 可以写成:

$$f(t) = \begin{cases} E_1 & (a \leq t < b \text{ 及 } c < t \leq d) \\ E_2 & (b \leq t \leq c) \\ 0 & (t < a \text{ 及 } t > d) \end{cases} \quad (1-1)$$

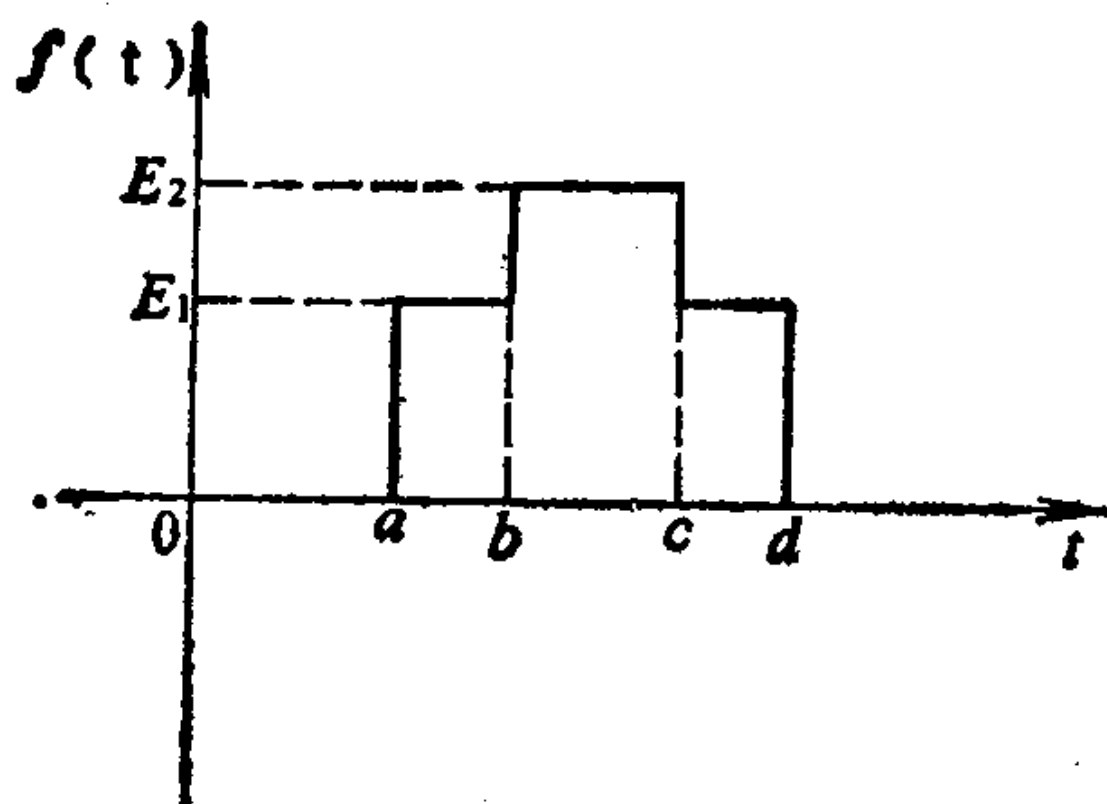


图 1-4 阶梯脉冲

某些脉冲的数学表达式还可以用阶跃函数表达式来描述。为此先简单介绍一下阶跃函数。

单位阶跃函数的定义为

$$1(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases} \quad (1-2)$$

它对应于图 1-5a 所示的波形。单

位阶跃函数的物理意义的解释, 可以用电压激励或电流激励来说明:

(1) 如果单位阶跃函数用来表示单位电压激励, 此函数表

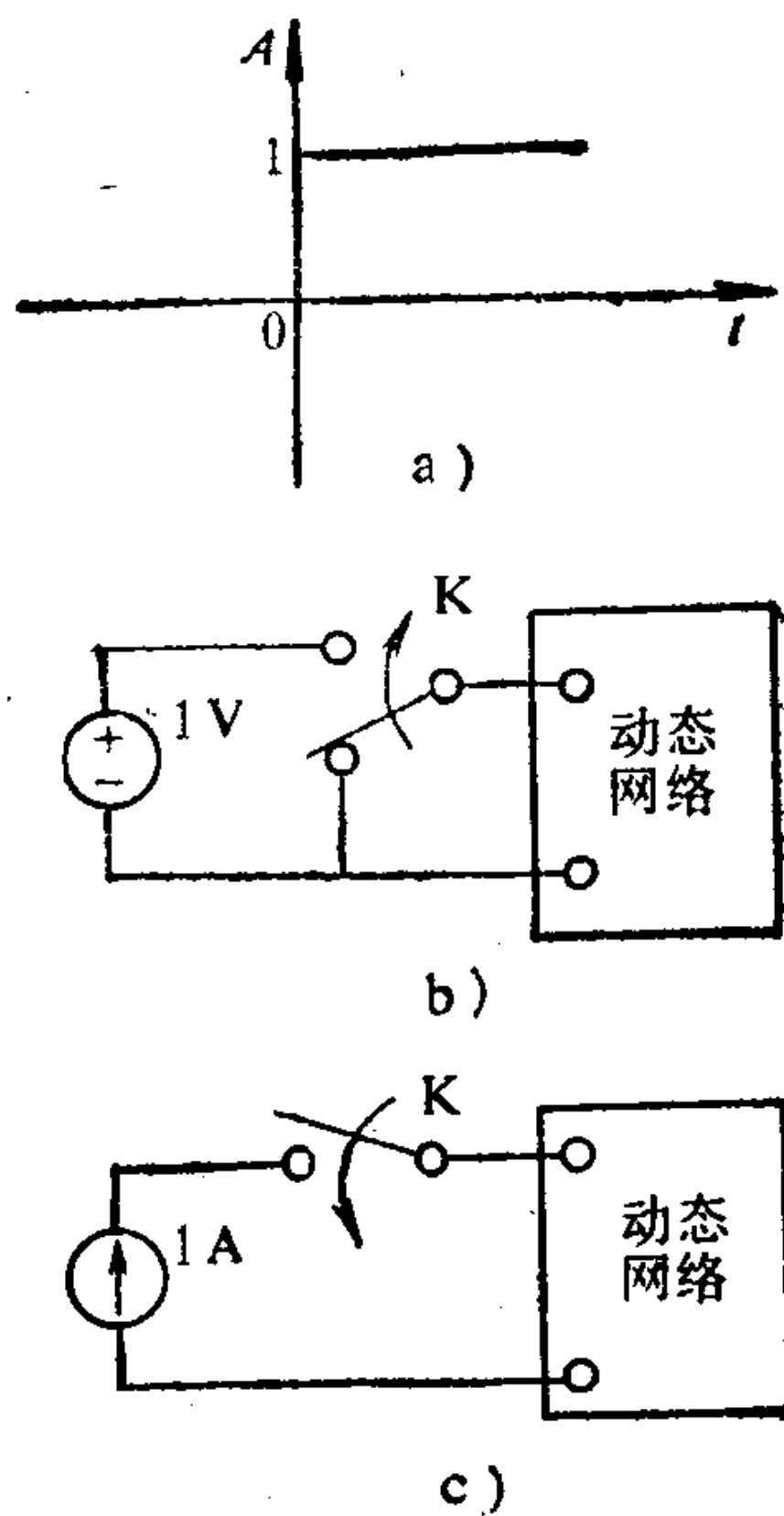


图 1-5 阶跃脉冲

a) 阶跃函数定义波形 b) 电压激励
c) 电流激励

示 1V 直流电压源在 $t=0$ 时与网络相连接, 在此之前网络的输入端一直被短路。如图1-5b所示, 开关K在 $t=0$ 以前将动态网络短路, 在 $t=0$ 时改换位置, 接通电源。

(2) 如果单位阶跃函数用来表示单位电流激励, 此函数可表示1A的直流电流源在 $t=0$ 时与动态网络相接, 在此之前网络的输入端一直开路。图1-5c中K在 $t=0$ 以前一直断开, 当 $t=0$ 时合上, 接通电流源。

对于图 1-6 所示的波形, 由于阶跃发生在 $t=t_0$ 时刻, 所以相应的单位阶跃函数表达式为

$$1(t-t_0)=\begin{cases} 0 & (t<t_0) \\ 1 & (t\geq t_0) \end{cases} \quad (1-3)$$

这就是延时阶跃函数。

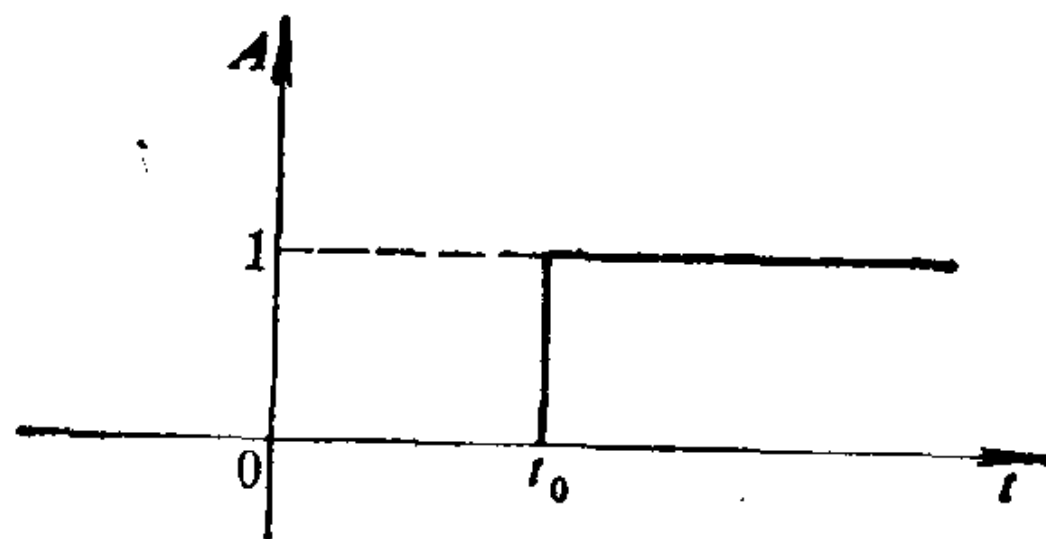


图1-6 延时阶跃脉冲

运用阶跃函数的定义式 (1-2) 与 (1-3), 可以将式 (1-1) 写成如下形式:

$$f(t)=E_1[1(t-a)-1(t-d)]+(E_2-E_1) \times [1(t-b)-1(t-c)]$$

这样, 就有两种描述脉冲波形的数学表达式, 至于在什么情形下使用什么表达式, 要看情况而定。一般来说, 采用谐波分析法进行分析与计算时, 使用式 (1-1) 的形式较多; 在进行拉普拉斯变换法分析计算时, 用阶跃函数表达式显得方便。

表 1-1 列出了几种常见脉冲波形的数学表达式, 供使用时参考、选用。