

上海市大学教材

数字电路

上册

上海市大学教材

数 字 电 路

上 册

上海师范大学物理系

上海人民出版社

上海市大学教材
数 字 电 路
上 册

上海师范大学物理系
上海人民出版
(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 12.125 字数 297,000
1975年6月第1版 1975年6月第1次印刷
印数 1—30,000

统一书号: 15171·180 定价: 0.96 元

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

前 言

结合典型产品组织教学，是无产阶级教育革命中的一个新生事物。遵照毛主席关于：“实践的观点是辩证唯物论的认识论之第一的和基本的观点”的伟大教导，我们选择 100 兆赫频率计为典型产品，到上海无线电仪器厂，和工人、技术人员一起试制，并以此为背景编写了《数字电路》讲义。此讲义先后在工人训练班、无线电专业脉冲数字电路课中试讲。在此基础上，由工农兵学员、工人讲师、革命教师共同战斗，作了进一步修改，写成《数字电路》教材。

回顾一年来的教学，我们体会到结合典型产品组织教学，能够帮助师生进一步加强理论联系实际，提高实际工作能力，是教学过程中最基本的实践活动。

就人类认识运动的秩序说来，总是由认识个别的和特殊的事物，逐步地扩大到认识一般的事物。我们以频率计为典型引出基本单元电路和组合电路，在结合频率计讲解的同时指出它们的共性，目的是为了解剖麻雀举一反三。此外，在介绍电路的工作原理时，尽可能把定性分析、定量计算结合起来，力求简明可行。

我们认为，典型总是相对的，没有一个产品能够概括所有的脉冲数字电路。因此，对于在生产实践中某些应用广泛的脉冲数字电路，根据我们实践的体会，也加以详细介绍。

以典型产品为背景来编写教材，对我们来说是一个新的尝试。由于我们对马列主义、毛泽东思想学习得很不够，教育革命的实践经验也很少，教材中一定会存在不少缺点和错误，恳切希望读者批评指正。

本书编写过程中，得到了上海无线电仪器厂工人、技术人员的大力支持和帮助，在此表示深切的谢意。

编 者 1975 年 1 月

05188/11

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第二章 线性电路的瞬态响应	8
第一节 线性电路瞬态特性的分析法	8
2-1-1 RC 电路的瞬态过程	8
*2-1-2 RL 电路的瞬态过程	11
2-1-3 RC 电路的微分方程求解法	12
*2-1-4 时间常数 τ 的物理意义	14
2-1-5 RC 电路的瞬态公式求解法	14
第二节 线性电路瞬态特性的运算分析法	18
第三节 常用线性电路的瞬态分析	23
2-3-1 耦合电路	23
2-3-2 微分电路	25
2-3-3 积分电路	29
2-3-4 脉冲分压器	31
第四节 思考题	34
第三章 晶体管的开关特性	37
第一节 二极管开关特性	37
3-1-1 静态分析	38
3-1-2 瞬态分析	39
第二节 晶体管开关特性	44
3-2-1 晶体管三种工作状态的特点	44
3-2-2 晶体管开关转换的物理过程	45
第三节 晶体管开关时间的定量分析	52
3-3-1 晶体管开启时间	52
3-3-2 晶体管下降时间	56
3-3-3 晶体管存储时间	57
第四节 加速电容改善开关时间	59

第五节 思考题	63
第四章 脉冲单元电路	65
第一节 门电路	65
4-1-1 “与”电路	66
4-1-2 “或”电路	75
4-1-3 负逻辑门电路	79
4-1-4 “非”电路(反相器)	80
4-1-5 “与或”、“与非”、“与或非”电路	88
4-1-6 特殊门电路	92
4-1-7 参考电路	99
第二节 双稳触发电路	101
4-2-1 双稳电路的构成	102
4-2-2 双稳电路工作原理	104
4-2-3 触发方式	110
4-2-4 双稳电路的设计	121
4-2-5 高速双稳电路	127
4-2-6 参考电路	136
第三节 单稳触发电路	138
4-3-1 单稳电路工作原理	140
4-3-2 单稳电路的主要参数	144
4-3-3 单稳电路的设计	147
4-3-4 单稳电路的应用	148
第四节 多谐振荡器	150
4-4-1 电路的构成	150
4-4-2 振荡频率的计算	153
4-4-3 发射极耦合多谐振荡器	154
4-4-4 参考电路	156
第五节 斯密脱电路	157
4-5-1 电路形式及工作原理	157
4-5-2 斯密脱电路的滞后特性	160
4-5-3 斯密脱电路的应用	161
4-5-4 斯密脱电路的设计	169
4-5-5 参考电路	172
第六节 锯齿波发生器	173
4-6-1 锯齿波的主要参数	173

4-6-2 锯齿波的形成	175
4-6-3 提高锯齿波线性的方法	176
第七节 思考题	184
第五章 脉冲组合电路	190
第一节 布尔代数	190
5-1-1 布尔代数的基本运算法则	191
5-1-2 布尔代数的基本定律	193
5-1-3 布尔代数的基本定理	195
5-1-4 布尔函数式的简化	196
5-1-5 小结	209
第二节 计数电路	210
5-2-1 计数制简介	210
5-2-2 二进制计数电路	216
5-2-3 十进制计数电路	221
5-2-4 可逆计数器	245
*5-2-5 可逆计数器的运算逻辑	258
第三节 寄存器	268
5-3-1 数码寄存器	269
5-3-2 移位寄存器	271
第四节 译码电路及十进制计数显示方式	274
5-4-1 译码器的基本原理	274
5-4-2 二进制译码器	276
5-4-3 顺序脉冲分配器	282
5-4-4 十进制数译码器	288
5-4-5 十进制数的显示方法	295
5-4-6 码的转换	305
第五节 分频电路	309
5-5-1 双稳分频电路	310
5-5-2 单稳分频电路	311
5-5-3 阶梯波分频电路	314
第六节 倍频电路	319
5-6-1 倍频的基本原理	320
5-6-2 倍频调试的几个实际问题	326
第七节 思考题	328
附 录	335

1. 脉冲信号的频谱	335
附-1-1 周期性脉冲信号的频谱	335
附-1-2 非周期性脉冲信号的频谱	348
2. 线性电路的变换分析法	356
附-2-1 福立叶频谱法	356
附-2-2 拉普拉斯运算法	360
附-2-3 卷积积分和重迭积分法	365
3. 脉冲信号的拉普拉斯变换表	372

第一章 绪 论

毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”

脉冲技术是近代电子技术中一项重要的基础技术。它诞生于二十世纪四十年代末，首先在雷达技术中得到了广泛的应用。到了五十年代初，由于工业和科学技术的发展，促使脉冲数字电路得到了很快的发展，并把它运用到计算技术中去，创造了高精度的数字电子计算机。由于数字电路具有速度快、精度高、抗干扰能力强等优点，使得在以后的年代中，无线电电子技术的数字化获得了飞跃的发展。目前无论在计算技术、工业自动控制、雷达、电视、遥控、遥测、测量仪表等国民经济各部门，都广泛地应用着数字电路技术。学习数字电路的目的，就是为了更好地利用它为社会主义革命和建设服务。

一 脉冲、数字电路

简单地讲，脉冲是指一种突然变化的电压或电流信号。图 1-1 所示为一些常见的脉冲信号的波形。从这些波形图中可以看出脉冲波有一个共同的特点，这就是它们的电压或电流在极短的时间内（微秒或毫微秒）发生突变，或者说波形中包含有突变的部分。例如：在矩形电压脉冲中，电压自零值突然跃增到峰值，经过一段时间后，又骤降到零值；在三角波中，电压渐增到某一正值后突变（在极短时间内）为渐减，零值后又突变到渐增。

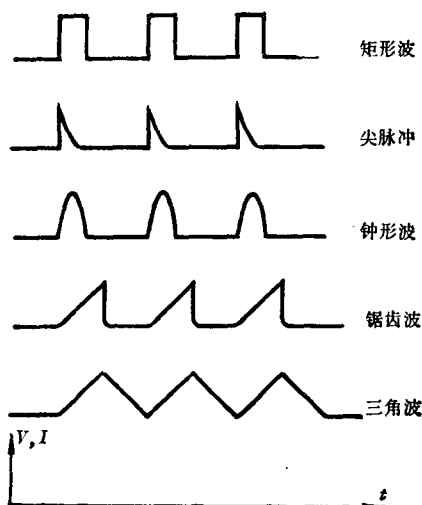


图 1-1 常见脉冲信号波形

为了表征脉冲波的特性,以便对它进行定量分析,这里以电压脉冲波为例,定义脉冲波的一些参数,如图 1-2 所示。

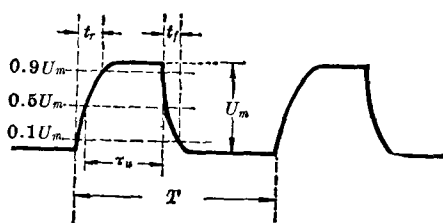


图 1-2 脉冲波参数的定义

脉冲幅度 U_m ——脉冲波形电压变化的最大值;

脉冲前沿 t_r ——波形由 $0.1 U_m$ 上升到 $0.9 U_m$ 所需的时间,有时也称为上升沿;

脉冲后沿 t_f ——波形由 $0.9 U_m$ 下降到 $0.1 U_m$ 所需的时间,有时也称为下降沿;

脉冲宽度 τ_u ——前沿的 $0.5 U_m$ 到后沿的 $0.5 U_m$ 的时间;

脉冲周期 T ——周期脉冲前、后两次脉冲出现的时间间隔。若以 f 表示脉冲重复频率, T 与 f 之间的关系为: $f=1/T$ 。

脉冲数字电路的内容,大致包括脉冲的产生、整形、传送、控制、记忆、计数等等。对数字电路来说,主要讨论“0”与“1”两种逻辑状

态的产生、变换以及各种算术运算。这些电路在数字电子计算机及各种数据处理装置中获得了广泛的应用。在电子技术中，“0”与“1”两种不同的逻辑状态是很容易实现的。例如：晶体管的通导（用“0”表示）与截止（用“1”表示）；电平的高与低等等。

本教材以 PS-43 型 100 MHz 数字频率计作为典型产品（以下简称 PS-43）。通过对这一典型产品的基本电路的分析、逻辑设计方法的介绍，来介绍数字电路的基本内容。

二 PS-43 频率计

图 1-3 所示为 PS-43 频率计的实物照片。

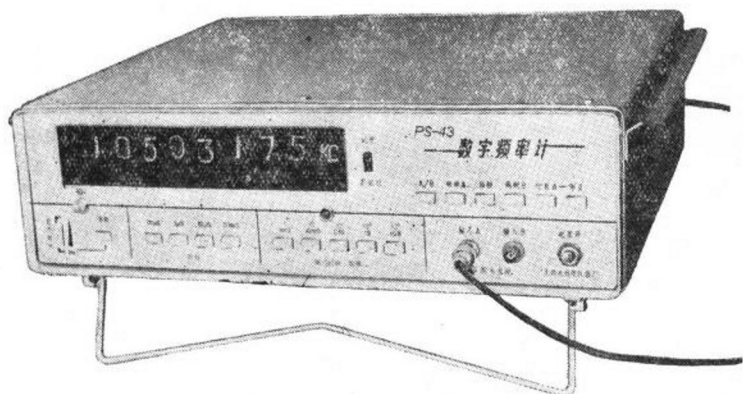
数字频率计的主要用途是测试信号的频率。频率的测量在国防工业、通讯工程、工业自动化、仪表、计量等方面都是经常需要的。例如，生产信号发生器时，就有对信号发生器的定标问题，这就需要精确测量该振荡器的频率。又如，在通讯工程中，通讯的载波频率也需要作精确的测定。频率的测量方法很多，在过去通常采用的仪器是外差式频率计、谐振式频率计等。由于这些测量仪器，有的以刻度盘形式给出数据，有的是以表头指针的摆动来给出测量结果，因此，无论在速度和测量精度方面都远远跟不上目前工业生产的需要。

但是事物总是在发展的，人们经过多次实践，终于成功地把数字电路这项新技术，引进了电子仪器的领域。电子仪器一旦“数字化”，就摆脱了表头、刻度盘的束缚，使仪器测试精度和速度大为提高。由于数字电路组成的仪器具有精度高、速度快等优点，可以说，“数字化”已成为电子仪器的发展方向。数字频率计也就是在这种基础上产生出来的一种数字式测量仪器。

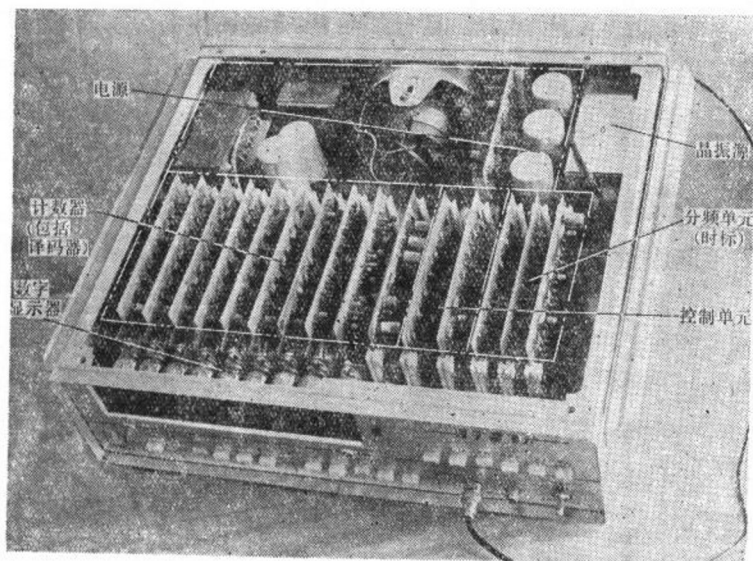
所谓信号的频率，即每秒钟信号变化的次数，可用下式表示：

$$f = \frac{N}{t} \quad (1-1)$$

式中, f 为信号频率; t 为时间; N 为时间 t 内信号变化的次数. 当 $t=1$ 秒时, N 值即为频率值 f . 式 (1-1) 也可称为测频的数学模型(描写物理现象的数学表达式). 显然, 要实现频率测量, 必须首先解决以下几个问题:



(a) 外形



(b) 内部结构

图 1-3 PS-43 数字频率计

(i) 怎样把信号的变化次数用数字表达出来? 即实现信号变化次数的计数问题;

(ii) 怎样获得一秒钟的时间标准?

(iii) 怎样测量一秒钟内被测信号的变化次数? 即实现式 $f = \frac{N}{t}$ 中的 N 和 t 之间的除号($\div$)问题。

以上三个问题的完整解决, 要用到数字电路中的各种基本电路及其逻辑组合。有关频率计的设计方法将在第九章中详细讨论。这里仅简单介绍实现上述三个问题的思想方法, 以便对数字频率计有一个初步的了解。

根据脉冲波形的定义, 脉冲波是一种突变的信号, 就好像人的脉搏那样, 它的计数问题是比较容易解决的。例如, 计数器就是记录脉冲个数的一种电子设备。因此, 要想办法把不属脉冲波的被测信号(例如正弦波), 经过一个整形电路变成可数的脉冲信号, 也就是使被测信号在每一个变化周期中产生一个脉冲信号。这样, 第一个问题的解决就归结为如图 1-4 那样的逻辑方块。

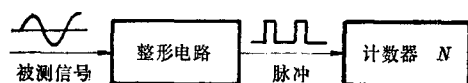


图 1-4 将信号变化次数用数 N 表示的逻辑方块

在电子电路中, 时间的概念实际上是某种信号周期的数值, 这是因为信号周期是一个时间量纲。例如, 信号频率 $f = 1 \text{ kHz}$, 其周期 $T = \frac{1}{f} = 1 \text{ ms}$ 。至于要求时间很精确, 那只需要这个信号源频率非常稳定。因此, 要获得一秒钟的时间标准, 实际上就是要找一个周期为一秒钟的非常稳定的信号源。显然, 石英晶体能够满足振荡稳定的要求(稳定度可高达 $10^{-8}/\text{日}$)。由于晶体振荡频率较高(例如, 5 MHz), 它的周期不可能正好为一秒, 因此必须把晶振波形先整形成脉冲, 然后经过一套脉冲分频电路把高重复频率的脉

冲信号变换为低重复频率信号，直至实现周期为一秒的信号。这样，时间标准问题归结为如图 1-5 所示的逻辑方块。

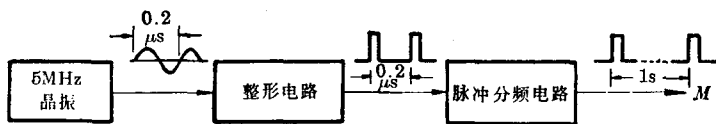


图 1-5 标准时间逻辑方块

最后来讨论实现 $f = \frac{N}{t}$ 中的除号问题。从图 1-4 可以看出，当被测信号源连续不断作用时， N 的数值将一直累加上升。现在的问题是要求测得的数 N 恰恰是信号在一秒钟里进入计数器的脉冲个数，这样计数器中的数值 N 才是频率 $f = \frac{N}{1} = N$ 。因此，要设法加一个控制电路，使得从整形电路输出的脉冲送到计数器累加时要受图 1-5 那样时标电路的控制。为此，把图 1-4 修改成图 1-6，其中控制信号是由图 1-5 所获得的时间标准。

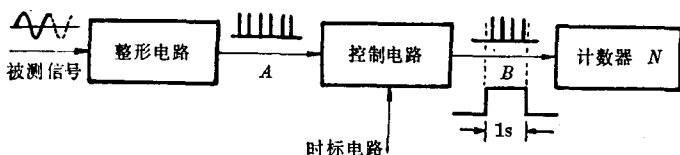


图 1-6 一秒钟内累加脉冲个数的逻辑方块

显然，当控制电路能够在时标电路 M 输出信号的两个脉冲周期期间开放 ($t=1$ 秒)，让被测信号脉冲通过，而在此时间之外均关闭，这样经过控制电路后的脉冲的个数 N 即为一秒钟内被测信号的脉冲个数，也就是被测信号的频率 f 。

综合上述三个问题，数字频率计的测频基本原理如图 1-7 所示。在图中增加的放大电路方块，目的是为了能对微弱信号也能进行测量，译码及显示是为了把计数器计得状态(代表数字)翻译并显示出来。

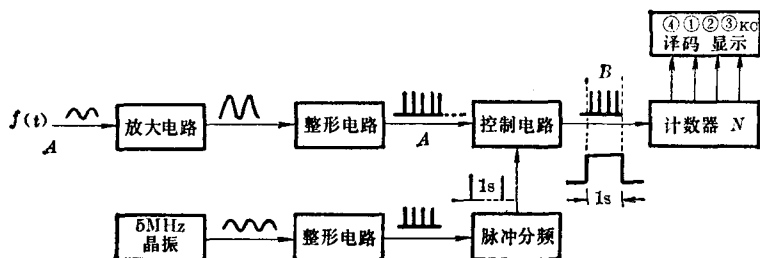


图 1-7 数字频率计测频逻辑方块图

从上面频率计方块原理图中可以看到，它基本上包括了脉冲数字电路中的主要内容。例如：放大、整形电路；脉冲波的形成、变换电路；控制电路（门电路）；计数器电路；以及计数电路的译码及显示电路等等；以及把这些电路组合成整机的逻辑设计问题。

因此，通过对这个典型产品的剖析与学习，对于我们掌握数字电路技术，培养分析问题和解决问题的能力是较有利的。

第二章 线性电路的瞬态响应

在各种类型的数字电路中,包含的分立元件有两类:一类是非线性元件——晶体管,它主要起着开关的作用;另一类就是线性元件——电阻、电容和电感,它主要起着吸放电磁能量的作用。研究脉冲过程,无论是脉冲的产生、传输或放大等,都要对线性电路的瞬态过程,即电阻、电容和电感的充放电(磁)过程及电磁振荡过程,进行定量的分析。本章介绍的内容有:线性电路瞬态过程的微分方程分析法和拉普拉斯变换分析法,以及几种常用的脉冲线性电路的瞬态特性。

第一节 线性电路瞬态特性的分析法

大家知道,线性电路在正弦信号作用下的稳态特性,可借助复数和矢量法进行分析。线性电路在非正弦信号作用下的瞬态特性与稳态特性的分析,除了用古老的微分方程求解法外,普遍采用的求解方法还有:频谱分析法;拉普拉斯变换法(也称运算法);阶跃函数法和脉冲函数法等(详见附录2)。这一节以常遇到的 RC 电路为例,详细地分析线性电路瞬态特性的物理过程,并运用微分方程求解法导出这类线性电路的瞬态公式。

2-1-1 RC 电路的瞬态过程

RC 电路是指由电阻 R 、电容 C 组成的简单电路。这里,主要研究 RC 电路在脉冲作用下的瞬态过程,即充放电现象的过程。这一过程在基础无线电中是不被重视的,但在数字电路中,它不仅构