

▶ 脉冲 与 数字电路

· 顾德仁等原编 万栋义编

(第二版)

高等教育出版社

内 容 简 介

本书系顾德仁等编《脉冲与数字电路》(上、下册)的第二版。经高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组委托宋亚民同志主审,吴佑寿同志复审,同意作为高等学校教材出版。

本书仍分脉冲电路与数字电路两部分。脉冲部分较第一版大为精简,突出晶体管开关特性及模型,主要内容有晶体管开关特性、脉冲的非线性形成与产生等;数字电路部分加强了系统性、内在联系,主要内容有数制与码、逻辑函数、组合逻辑及时序逻辑等,并介绍了集成存贮器、数-模及模-数转换等。

本书可供高等学校工科无线电技术类、电子类专业作为教材,也可供有关工程技术人员作为学习脉冲技术与数字技术的参考书。

本书责任编辑 姚玉洁

高等学校教材
脉冲与数字电路
(第二版)

*

顾德仁等 原编 万栋义 参编
高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
二二〇七工厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 30.75 字数 703,000
1979年7月第1版 1986年5月第2版 1986年5月第1次印刷
印数 00,001—10,800
书号 15010·0758 定价 4.65 元

第二版前言

本书是为无线电技术及电子工程等专业开设脉冲与数字电路课程而编写的一本教材。课程为一学期,长17周,每周5学时。

本书是1979年出版的《脉冲与数字电路》(上、下册)的第二版。由于技术的发展以及教学内容、教学方法的更新,需对原书进行大幅度的修订,在撰稿时参照了1980年教育部审订的本课程的教学大纲以及几次教学讨论会的纪要,并吸收了各校师生对第一版的意见与修改建议。

与第一版相比,第二版将原脉冲电路部分的八章压缩成四章,一则是压缩篇幅,二则是突出开关特性及电路模型的叙述;重写逻辑函数一章,以加强系统性、深度与广度;重写集成逻辑门一章,压缩集成逻辑门内部电路的叙述,重点突出集成逻辑门的外特性,并将集成门模型化,用于集成门脉冲电路的分析与设计上;重写大规模集成电路一章,压缩存贮器内部电路的篇幅,重点叙述集成存贮器的外特性,并适当介绍一些新的进展;重写二进制一章,将数制与码合为一章,除介绍常用的二进制、八进制、十进制及十六进制及其相互转换方法外,还介绍目前数字系统中常用的一些编码方式;增加组合逻辑电路一章,除系统介绍两级、三级门的组合电路的分析与设计外,还介绍目前数字系统中常用的全加器、编码器与译码器、码组变换器、数据选择器、数据分配器、比较器等逻辑功能及设计特点,而这部分的中规模集成电路典型产品的性能介绍拟放在与本课程有关的实验课中进行;改写触发器一章,增加边沿触发型触发器的叙述,增加脉冲上升沿及下降沿的逻辑表示方式,增加增量型状态方程,为处理脉冲型异步时序电路作准备;改写时序网络一章为两章,其中一章系统介绍同步时序电路分析与设计方法,包括脉冲型异步时序电路的分析与设计方法,另一章则介绍寄存器、计数器、序列发生器的分析与设计,增加反馈移位寄存器一般性能的介绍,至于中规模的集成电路产品的性能介绍也拟放在实验课中进行;除此之外,为加强时序逻辑的系统性,还增加了异步电平时序电路一章,以使学生对这方面的内容有一个初步的了解;最后,改写数-模与模-数转换一章,增加对模拟开关及取样-保持电路的叙述。

对于脉冲电路与数字电路的处理,仍维持第一版的安排,将它们按相对独立的方式编写,以方便那些只想学习数字电路的读者,也方便那些先讲数字电路后讲脉冲电路的院校。

倘若选用本书作教材,教师可自行决定其取舍,对于本书中打△号的选学内容,跳过它也不会影响课程的连续性,一个参考性的教学安排如下:

绪论	1学时
双极型晶体管及场效应管开关特性	8学时
脉冲波形变换电路	6学时
脉冲波形产生电路	6学时
锯齿波电压发生器	4学时

数制与码	2 学时
逻辑代数	8 学时
集成逻辑门电路	6 学时
组合逻辑电路	6 学时
集成触发器	6 学时
同步时序电路	8 学时
常用同步时序电路	6 学时
电平异步时序电路	6 学时
集成存贮器	6 学时
数-模与模-数转换	6 学时

本书由高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组委托宋亚民副教授审阅, 吴佑寿教授复审, 提出了许多宝贵意见, 编者在此表示诚挚的谢意。

本书在撰稿过程中, 曾得到成都电讯工程学院院长顾德仁教授、研究生部主任黄香馥教授、电子工程系系主任黄顺言教授以及高等教育出版社责任编辑姚玉洁同志多方面的帮助与指教, 编者在此表示深切的谢意。

由于编者水平有限, 在内容的取舍上、处理上以及叙述方法上也可能有不当或错误之处, 殷切希望使用本书的教师、学生以及工程技术人员提出批评及修改意见。

万株义

1985.11.

第一版前言

本教材是根据1977年12月教育部在合肥召开的高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议所讨论拟定的同名课程教材编写大纲所编写的。它是供高等工科院校无线电整机类专业三年级学生使用的一本教科书。学生在学习本课程以前,应该学习过有关一般电路理论、电子器件及低频放大等方面的一些课程。

这本教材内容可以划分为两大部分,第一部分为脉冲电路,第二部分为数字电路。由于历史原因,在我国多数院校中,目前这两部分内容仍合并在一门课程——脉冲与数字电路内讲授。但是,就学科体系来讲,编者认为脉冲电路应该属于模拟电路的范畴(见绪论中的论述),因此在编写过程中,编者有意识地使本教材的两部分具有某种相对的独立性,俾使本教材也可以供两门独立的课程——脉冲电路与数字电路使用,而由不同的教师讲授。

在编写本教材时,编者考虑到目前脉冲与数字电路的一个主要发展方向——集成化,在内容取舍上给予集成电路以足够的重视。数字电路内容全部是属集成的,并且写入了大规模集成电路一章。但鉴于我国目前的生产技术现状,在几年内采用分立元件的脉冲电路还不会完全被摒弃,特别是某些快速脉冲电路还得由分立元件构成,因此在脉冲电路部分,分立元件仍占大部分篇幅。全书按篇幅来划分,脉冲与数字电路各占一半,而分立元件电路,包括器件的特性描述在内大约只占40%。一些有关新器件的内容,如注入逻辑及电荷耦合器件也在本教材中得到反映。

浏览一下目录,就可以对本教材内容有个一般的了解。

本书第一章绪论主要是对本课程的研究范围作一个总的评述,简单讨论一下脉冲的主要参数,并对暂态分析的数学方法作一个扼要的叙述,后一部分内容学生已在前修课程中学过,可供复习自学。第二章是关于脉冲的线性形成,这在脉冲电路课程中是一个重要内容,也是基础,但是它的大部分内容,特别是处理方法是学生在前修课程中已经学过的,因此可以用比较少的时间来讲授,但可以要求学生多作些习题。

第三、四章是关于器件(包括二极管、三极管及场效应管)的开关特性以及应用它们组成的一些简单脉冲电路,如限幅器、钳位器、比较器及选通门等。编者认为把这些简单电路的介绍与器件结合起来有利于学生掌握器件的开关特性。

第五、六章是由分立元件构成的主要脉冲电路。第五章是关于锯齿波发生器,重点是讲锯齿波电压发生器,对某些专业,锯齿波电流的内容可以不讲。第六章是关于张弛振荡器,这一章电路形式比较多,教师可选择其中某几个讲授,让学生举一反三,通过自学来掌握其他的电路形式。

第七章是属于集成脉冲电路。鉴于运算放大器的一些基本参数已在前修课程中讲授过,这里只作扼要的介绍。通过这一章的学习,学生不仅能学会如何用集成运算放大器来构成各种脉冲电路,也可以加深对前几章已介绍过的由分立元件组成的脉冲电路的理解。

第八章为负阻器件脉冲电路,重点介绍两类负阻器件的伏安特性、平衡点的稳定性及负载线的选择,重点介绍了隧道二极管电路。

第九章以后为数字电路部分。

第九章介绍二进制数以及二进制数与十进制数的相互转换方法,并对二-十进码作扼要的介绍。

第十章为逻辑函数,重点介绍逻辑代数的基本运算规则,用卡诺图简化逻辑函数及组合逻辑网络的设计方法。

第十一章为集成逻辑门,在介绍集成逻辑门时以分立元件电路为基础,重点介绍 TTL 集成逻辑门的性能。

第十二章为集成触发器,在介绍 $R-S$ 触发器时,以逻辑门为基础,在介绍其他类型触发器时又以 $R-S$ 触发器为基础,重点介绍触发器的逻辑功能。

第十三章为时序逻辑网络,重点介绍同步时序逻辑网络的设计方法。在设计过程中,采用一种“文字填写卡诺图”法,作者认为这种方法虽然可能使初学者增加一些学习上的困难,但它有利于触发器的选型、便于填写卡诺图以及能减少一半卡诺图等优点。

第九章至第十三章可以认为是数字电路的基础。

第十四章为编码、译码、码组转换及校验,重点介绍数字系统内接口电路中广泛使用的二进制与二-十进码相互转换的方法。

第十五章为算术运算电路,重点介绍信息处理系统中快速运算方面的电路。

第十四章及第十五章的内容亦可认为是数字电路基本内容的具体运用,教师在讲授时,可根据不同专业的需要从中选择有关内容作为组合逻辑及时序逻辑设计举例,安插在前面第十章及第十三章内讲授。

第十六章为数字电路与模拟电路的接口电路,重点介绍数-模及模-数几种典型变换方法。这部分内容亦可放在有关的专业课程讲授。

第十七章为大规模集成电路,重点介绍 MOS 存贮器,鉴于近年来愈来愈多的大规模集成电路问世,这一部分内容也是不可缺少的,本章对注入逻辑及电荷耦合器件只作了一般性的介绍,使学生对这两种新型器件的原理及应用前景有所了解。

本教材是由成都电讯工程学院《脉冲与数字电路》编写组编写的,顾德仁同志任主编。第一、二、七、八、九及十章由顾德仁同志编写;第三、四、五及六章由龚之春同志编写;第十二、十三、十四、十五章由万栋义同志编写;第十六章由万栋义同志、龚之春同志合编;第十七章由沈铎同志编写;第十一章由杨成忠同志编写;习题由成都电讯工程学院 107 教研室部分同志编写。本书的绘图工作是由李惠敏、湛黔萍同志完成的。

本教材初稿先由西北电讯工程学院余雄南等同志审阅,并提出了修改意见。又于 1979 年 1 月在成都召开的教材审稿会上讨论过,到会的西北电讯工程学院等十多所兄弟院校的同志提出了很多宝贵的意见,编者在此表示深切的谢意。

由于本课的内容,特别是数字电路近年来发展十分迅速,编者水平有限,在内容的取舍上不免挂一漏万,叙述方法也可能有不当或错误之处,欢迎同志们提出批评与修改意见。

编 者

目 录

绪论	1	2.2.3 共集电极限幅器	65
第一章 双极型晶体管及 场效应管开关特性	3	2.2.4 射极耦合限幅器	66
§ 1.1 半导体二极管的开关特性	3	§ 2.3 电平钳定器	68
1.1.1 半导体二极管的静态开关特性	3	2.3.1 二极管电平钳定器	68
1.1.2 半导体二极管开关的动态模型	8	2.3.2 三极管基极电平钳定电路	72
1.1.3 二极管开关时间	10	△2.3.3 同步电平钳定器	76
§ 1.2 双极型三极管静态开关特性	12	习题	77
1.2.1 非线性数学模型	13	第三章 脉冲波形产生电路	81
1.2.2 分段线性模型	17	§ 3.1 双稳态触发电路	81
§ 1.3 双极型三极管反相器开关 特性	22	3.1.1 一般结构	81
1.3.1 正常工作条件	23	3.1.2 射极耦合电平触发器	83
1.3.2 负载特性	24	3.1.3 运算放大器电平触发器	85
1.3.3 开关特性	25	3.1.4 集-基耦合脉冲触发器	87
1.3.4 三极管自身的开关时间	26	§ 3.2 单稳态触发电路	91
△ § 1.4 双极型三极管开关的动态 模型	28	3.2.1 集-基耦合单稳态触发电路	91
1.4.1 动态模型	28	3.2.2 运算放大器构成的单稳态电路	93
1.4.2 分段线性动态模型	30	§ 3.3 自激多谐振荡器	95
1.4.3 三极管反相器开关时间计算	31	3.3.1 集-基耦合自激多谐振荡器	95
§ 1.5 场效应管开关特性	38	3.3.2 运算放大器构成的自激多谐振荡器	98
1.5.1 场效应管的数学模型	38	△ § 3.4 间歇振荡器	99
1.5.2 结型场效应管数学模型	40	3.4.1 它激间歇振荡器	99
1.5.3 NMOS 管反相器开关时间	41	3.4.2 自激间歇振荡器	101
习题	47	习题	103
第二章 脉冲波形变换电路	51	第四章 锯齿波电压发生器	108
§ 2.1 二极管限幅器	52	§ 4.1 一般原理	108
2.1.1 二极管限幅器的基本工作原理	52	4.1.1 锯齿波电压发生器的基本参数	108
2.1.2 限幅器的静态开关特性	54	4.1.2 获得锯齿波电压的基本方法	110
2.1.3 限幅器的动态开关特性	58	§ 4.2 恒流源锯齿波电压发生器	111
§ 2.2 三极管限幅器	62	§ 4.3 积分电路与自举电路	113
2.2.1 共发射极限幅器	62	4.3.1 积分电路	113
2.2.2 共基极限幅器	64	4.3.2 自举电路	115
		习题	118
		第五章 数制与码	119
		§ 5.1 数制	119

§ 5.2 数制转换	122	6.6.1 隐含关系	159
§ 5.3 码	124	6.6.2 隐含项及隐含项集	161
5.3.1 二-十进制码(BCD)	125	6.6.3 确定函数本原隐含项集的方法	161
5.3.2 格雷码(Gray Code)	127	§ 6.7 逻辑函数化简	165
5.3.3 奇偶校验码	128	6.7.1 逻辑函数化简的一般概念	165
5.3.4 原码、补码及反码	129	6.7.2 卡诺图法化简逻辑函数	166
附录 美国七位信息交换标准码	131	6.7.3 表格法化简逻辑函数	169
习题	131	6.7.4 代数法化简逻辑函数	172
第六章 逻辑代数	133	6.7.5 多个逻辑函数的整体化简	175
§ 6.1 逻辑代数的基本运算	133	6.7.6 异-与逻辑函数标准型化简	182
6.1.1 与运算(逻辑乘)	133	习题	187
6.1.2 或运算(逻辑加)	134	第七章 集成逻辑门电路	191
6.1.3 非运算(补运算, 反演运算)	135	§ 7.1 正逻辑与负逻辑	191
§ 6.2 公理与定理	136	§ 7.2 晶体管-晶体管逻辑门(TTL)	192
6.2.1 公理	137	7.2.1 TTL 门的工作原理	192
6.2.2 定理	137	7.2.2 TTL 门的主要特性	194
6.2.3 对偶与反演	138	7.2.3 TTL 门的改进型	197
§ 6.3 几种导出逻辑运算	140	7.2.4 TTL 门扩展器	199
6.3.1 与非运算	140	7.2.5 集电极开路 TTL 门(OC 门)	200
6.3.2 或非运算	140	7.2.6 三态 TTL 门(TS 门)	202
6.3.3 异(异或)运算	141	7.2.7 TTL 异门及同门	203
6.3.4 同运算(符合运算)	142	§ 7.3 射极耦合逻辑门(ECL)	204
§ 6.4 逻辑函数标准型	144	7.3.1 ECL 电流开关	204
6.4.1 任何逻辑函数可表成积之和式	144	7.3.2 ECL 门	204
6.4.2 任何逻辑函数的积之和式 可写成积之和标准型	144	7.3.3 ECL 连线逻辑	205
6.4.3 任何逻辑函数可表成和之积式	144	§ 7.4 金属-氧化物-半导体逻辑门 (MOS 门)	205
6.4.4 任何逻辑函数的和之积式可写 成和之积标准型	144	7.4.1 NMOS 逻辑门	206
6.4.5 由真值表导出逻辑函数标准型	145	7.4.2 CMOS 门	207
6.4.6 完全描述逻辑函数及 非完全描述逻辑函数	147	§ 7.5 逻辑门用于波形产生电路	210
6.4.7 逻辑运算的完备性	148	7.5.1 TTL 反相器等效电路	211
6.4.8 异-与逻辑函数标准型	149	7.5.2 TTL 门单稳态触发电路	211
§ 6.5 逻辑函数卡诺图	150	7.5.3 TTL 门多谐振荡器	216
6.5.1 卡诺图的构成	150	7.5.4 CMOS 门张弛振荡器	219
6.5.2 卡诺图运算	153	习题	222
6.5.3 卡诺图中 1 单元合并	154	第八章 组合逻辑电路	225
6.5.4 文字卡诺图	157	§ 8.1 组合逻辑电路的分析与设计	225
§ 6.6 逻辑函数隐含关系	159	8.1.1 两级逻辑门	226
		8.1.2 三级逻辑门	228
		8.1.3 冒险	233

§ 8.2 编码器与译码器	235	置 1 及异步置 0	284
8.2.1 编码器	235	§ 9.6 触发器时间关系及激励表	286
8.2.2 译码器	238	9.6.1 触发器时间关系	286
§ 8.3 数据分配器与数据选择器	245	9.6.2 触发器激励表	287
8.3.1 数据分配器	245	习题	293
8.3.2 数据选择器	247	第十章 同步时序电路	296
§ 8.4 码组变换器	249	§ 10.1 组合电路与时序电路的区别	296
8.4.1 格雷码(Cray)与二进码的码组 变换器	249	§ 10.2 同步时序电路分析	298
8.4.2 七段数字显示管的码组变换器	251	§ 10.3 同步时序电路设计	307
§ 8.5 全加器与比较器	256	§ 10.4 状态转换表化简	317
8.5.1 全加器	256	10.4.1 完全描述原始状态转换表 的化简	318
8.5.2 比较器	259	△10.4.2 非完全描述状态表化简	321
习题	262	§ 10.5 状态编码	325
第九章 集成触发器	264	习题	329
§ 9.1 基本触发器	264	第十一章 常用同步时序电路	333
9.1.1 触发器输入-输出逻辑关系及 时间关系	265	§ 11.1 移位寄存器	333
9.1.2 触发器的状态转换真值表及 特征方程	268	11.1.1 单向移位寄存器	333
9.1.3 $R-S$ 触发器作二进码信息存储器	269	11.1.2 双向移位寄存器	335
9.1.4 或非门构成 $R-S$ 触发器	270	§ 11.2 反馈移位寄存器	336
§ 9.2 钟脉冲控制的 $R-S$ 触发器	270	§ 11.3 同步计数器	346
9.2.1 钟脉冲 $R-S$ 触发器逻辑功能	271	11.3.1 二进码同步计数器	346
9.2.2 钟脉冲 $R-S$ 触发器状态转换真值 表及特征方程	272	11.3.2 BCD 码同步计数器	351
9.2.3 由与或非门构成钟脉冲 $R-S$ 触 发器	273	11.3.3 移位型计数器	354
§ 9.3 主-从型触发器	273	11.3.4 分数分频器	359
9.3.1 引言	273	§ 11.4 异步计数器	361
9.3.2 主-从型 $R-S$ 触发器	274	11.4.1 异步计数器分析	361
9.3.3 主-从型 $J-K$ 触发器	275	11.4.2 异步计数器设计	364
9.3.4 主-从型 D 触发器	276	11.4.3 另一种设计方法	368
9.3.5 主-从型 T 触发器	276	习题	371
9.3.6 增量型特征方程	277	第十二章 电平异步时序电路	373
§ 9.4 边沿触发型触发器	278	§ 12.1 异步时序电路分析	373
§ 9.5 触发器异步置 1 及异步置 0	281	§ 12.2 竞争与冒险	379
9.5.1 主-从型 $J-K$ 触发器的异步置 1 及异步置 0	281	12.2.1 竞争	379
9.5.2 边沿触发型 D 触发器的异步		12.2.2 冒险	380
		12.2.3 同步时序电路与异步时序电路 的区别	384
		§ 12.3 状态转换表建立与化简	384
		12.3.1 建立原始状态流程表	384

12.3.2 原始状态流程表化简	389	13.6.2 I ² L 基本逻辑电路	437
§ 12.4 状态编码	394	习题	438
§ 12.5 组合电路设计	397	第十四章 数-模及模-数转换	440
习题	401	§ 14.1 数-模转换器(DAC)	440
第十三章 集成存贮器	404	14.1.1 概述	440
§ 13.1 存贮器的基本概念	404	14.1.2 二进制权电阻 DAC	441
§ 13.2 顺序访问存贮器	405	14.1.3 T 形电阻 DAC	446
13.2.1 移位寄存器顺序访问存贮器	405	14.1.4 变形二进制码权电阻 DAC 及 BCD 码 DAC	447
13.2.2 MOS 触发器及 MOS 移位 寄存器	407	§ 14.2 电子模拟开关	451
§ 13.3 只读存贮器(ROM)	410	14.2.1 二极管模拟开关	451
13.3.1 只读存贮器结构	411	14.2.2 双极型三极管模拟开关	452
13.3.2 可编程 ROM(PROM) 及可抹除 ROM(EPROM)	413	14.2.3 结型场效应管(J-FET) 模拟开关	454
13.3.3 ROM 的应用	416	14.2.4 CMOS 模拟开关	456
13.3.4 可编程序逻辑阵列(PLA)	421	§ 14.3 电流激励 DAC	456
§ 13.4 随机访问存贮器(RAM)	423	§ 14.4 模-数转换(ADC)	460
13.4.1 双极型三极管存贮单元	424	14.4.1 取样定理	460
13.4.2 MOS RAM 存贮单元	425	14.4.2 取样-保持电路	462
13.4.3 RAM 结构	427	14.4.3 量化与编码	463
13.4.4 RAM 的位扩展与字扩展	429	§ 14.5 几种典型的 ADC	465
△ § 13.5 电荷耦合器件(CCD) 存贮器	431	14.5.1 串-并行 ADC	465
13.5.1 CCD 的工作原理	431	14.5.2 逐次比较 ADC	468
13.5.2 CCD 存贮器结构	434	14.5.3 双积分 ADC	470
△ § 13.6 I ² L 大规模集成电路	436	习题	471
13.6.1 I ² L 的工作原理	436	参考书目	473
		索引	474

绪 论

1. 模拟电路与数字电路

在近代电子工程中,按照所处理的信号形式,通常将电路分成两大类:模拟电路及数字电路。模拟电路处理的是模拟信号;数字电路处理的是数字信号。

所谓模拟信号,通常是指模拟真实世界物理量的信号形式。例如,模拟话音或者图象各点的亮度变化、模拟温度或者压力变化等的信号,都是模拟信号。其特点是,它们在时间上及数值上都是连续地、平滑地改变的,可取一定范围内的任意值。这就说明,对于模拟信号,我们必须进行测量。

所谓数字信号,是指时间上及数值上都是离散的(不连续的)信号形式。例如,人口统计或者汽车产量统计等结果,都是数字信号。其特点是,它们只能按阶梯变化和取值。这就是说,对于数字信号,我们只需进行计数,而无需考虑阶梯内信号的实际形状。

我们知道,所谓脉冲,通常是指在短暂时间间隔内作用于电路的电压或者电流,而这个时间间隔可与电路的暂态过渡历程持续期相比拟。常见的尖脉冲、矩形或者梯形脉冲、锯齿波脉冲等,都是脉冲信号的例子。就广义而言,凡按非正弦规律变化的电压或者电流都可称为脉冲。

脉冲信号是一种模拟信号,处理脉冲信号的模拟电路称为脉冲电路。所谓处理,通常定义为脉冲波形的产生与变换。

本书中,脉冲电路由电阻、电容、电感、变压器及晶体管或者场效应管组成。应当注意,在脉冲电路中,晶体管或者场效应管通常处于截止状态或者饱和状态,而放大状态仅仅是一个过渡状态而已;电容不是用来隔去直流成分的,因而需注意其充电或者放电过程。对于脉冲电路,分析的重点不在于电路的放大倍数、频应及非线性失真等,而是着重分析输入和输出波形的形状、幅度及重复周期等,这是与模拟线性电路不同之处。

在数字电路中,电压或者电流通常只有两个状态:高电平或者低电平;有电流或者无电流。这样的两个状态可用逻辑1及逻辑0表示之。数字信号通常是以时间上或者空间上这样的0、1符号序列来表示的。数字电路输入与输出的0、1符号序列间的逻辑关系便是数字电路的逻辑功能。因而,数字电路亦可认为是实现各种逻辑关系的电路。

数字电路通常由逻辑门、触发器、计数器及寄存器等逻辑部件构成,数字电路分析的重点已不是其输入、输出间波形的数值关系,而是输入、输出序列间的逻辑关系,这是与脉冲电路不同之处。

在近代电子工程中,愈来愈多地以数字信号形式来处理信息,这是由于:

1) 数字电路具有极高的稳定性与可靠性,其输入、输出间的逻辑关系不那么依赖于电路及

元件的稳定性,因为电路只需区别逻辑 0、逻辑 1 状态即可,而无需表明逻辑 1 或者逻辑 0 是精确的多少伏电压电平。

2) 欲提高信号处理的精度,可用增长数字信号 0、1 序列的长度(位数)的方法来达到。原则上,处理的精度不受限制。

3) 数字电路,尤其是可编程序的数字电路,具有逻辑推演及判断能力,也即具有智能。

4) 数字式信息可方便地用数字电路长期存贮。

5) 便于采用数字计算机进行运算及处理,进行实时控制。

以上这些优点,随着大规模及超大规模数字集成电路的长足进展及近代微计算机革命,愈益显出其重要性。目前,数字式测量仪表,如数字式电压表、数字式频率计,已广泛使用;智能数字式仪器已进入实用阶段;话音及图象处理已实现数字化;雷达数据处理也已采用数字形式;各种生产过程的自动化也与数字电路及微计算机的使用有着密切的联系。可以预见,八十年代数字电路将得到愈来愈广泛的应用,在电子电路中的比重也会愈来愈大。

当然,这并不是说,模拟电路就没有发展前途了。有些工程问题,即使用数字形式处理技术上是可行的,但经济上显得很不利,仍将采用模拟技术进行处理;此外,某些新型器件的出现,如电荷耦合器件,不仅可供数字电路使用,也给模拟信号的处理带来了新的可能性。

2. 课程范围及发展趋势

本课程大致分成两部分。第一至四章为脉冲电路,第五至第十三章为数字电路,第十四章为模拟与数字的接口电路。

在学习脉冲电路时,所需的基础知识是电路理论、半导体器件及微分方程,把握的重点是输入、输出波形间的相互关系;在学习数字电路时,所需的基础知识是逻辑代数等离散数学以及图论等,把握的重点是输入、输出间序列的逻辑关系。

脉冲电路的发展趋势是集成化、超高速及大功率。在脉冲电路的分析与设计方面,发展的趋势是根据非线性电路理论,用计算机辅助设计与分析,这不仅可以更深入、更精确地理解电路的工作机理,亦为发掘新的电路结构提供了可能性。

至于数字电路的发展趋势,曾有人推测,利用程序逻辑概念及微处理器,可以取代传统的逻辑设计。数年来,数字技术发展的实践证明,情况并不是这样的。数字电路的逻辑设计方法肯定会由于大规模集成电路及微处理器的广泛使用而改变它的方向与重点,近代的数字系统,例如以片-位机为中心的 digital 处理系统,逻辑设计主要是接口设计;但是,传统的逻辑设计方法仍然是基础性质的,十分有用的。

除去接口设计外,数字电路的研究仍在不断扩展,计算机辅助设计便是一个方向。此外,数字电路的故障检测与诊断、多值逻辑与模糊逻辑的数字电路亦在不断的探索中。

第一章 双极型晶体管及场效应管开关特性

与线性电子电路一样,在脉冲电路中仍然广泛采用二极管、双极型三极管及场效应晶体管作无源或有源器件。不过在线性电子电路中,这些器件通常工作于放大状态,而在脉冲电路中,这些器件大都工作于开关状态。例如,双极型三极管由截止状态快速经过放大状态进入饱和状态;或者反过来,由饱和状态快速经过放大状态进入截止状态。通常所指的脉冲电路就是由这样的开关器件与电阻、电感、电容及变压器构成的。本章将介绍这些开关器件的开关特性,包括静态特性及动态特性。

一个电子器件作开关,是指这个器件具有两个可区分的工作状态,而这两个可区分的工作状态是用该器件输出端参数来描述的。这些参数可能是输出电阻、输出电压或输出电流。因而,可区分状态可描述为输出端是高阻状态或低阻状态;输出端是高电平电流状态(导通状态)或者低电平电流状态(截止状态);等等。不过,描述这些状态的值应有明显的差别。

一个开关器件,通常还要求有外控端,即在外加控制信号作用下,它能从一个状态转换到另一个状态。状态之间相互转换所需用的时间称为开关时间。

一个电子器件用作开关,其输入端可以是一个或者多个,而输出端亦可以是一个或者多个。本章介绍单输入及单输出端的电子器件的开关特性,至于多输入端及多输出端的电子开关将在数字电路部分介绍。

在介绍实际电子器件的开关特性之前,我们先定义理想开关。一个理想的电子开关,在接通状态下,输出电压应等于零(接通电阻等于零);而在断开状态下,输出电流应等于零;(断开电阻等于无穷大),且开关时间亦等于零。一个实际使用的电子开关应当在一定程度上逼近于理想开关。

本章先介绍半导体二极管的开关特性,然后再介绍双极型半导体三极管的开关特性,最后介绍场效应晶体管的开关特性。

§ 1.1 半导体二极管的开关特性

1.1.1 半导体二极管的静态开关特性

在近代脉冲电路中,大量使用硅材料制成的电子器件作开关,其主要原因是硅材料制成的开关器件较锗材料制成的开关器件有较好的温度特性及较宽的工作温度范围,动态开关特性亦较好。图 1-1 示出半导体二极管静态伏-安特性曲线的一般形式。所谓静态伏-安特性,是指直流电压与直流电流之间的关系,也用于表示变动电压与变动电流之间的关系,不过变动的速率应相当地低,以致于开关器件的惯性可以忽略不计。

在图 1-1 中,实线是指硅管的伏-安特性曲线,虚线是指锗管的伏-安特性曲线。由图可见,

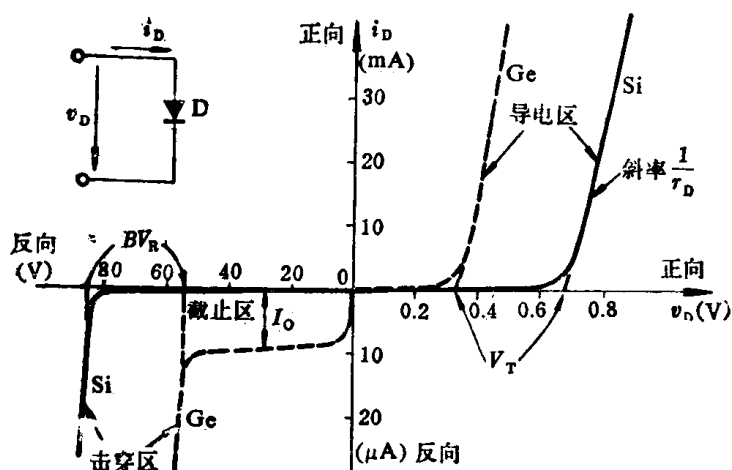


图 1-1 二极管静态伏-安特性

在二极管端电压 $v_D = 0$ 时, 二极管电流 $i_D = 0$; 当 $v_D > 0$ 后, 二极管出现电流, 但起始数值甚小; 当 v_D 超过一个门限电压(阈值) V_T 之后(对于硅管, V_T 约为 0.6V 至 0.7V; 对于锗管, V_T 约为 0.2V 至 0.3V), 二极管电流才显著增大, 并呈现出很低的增量电阻 ($\Delta v_D / \Delta i_D$)。 i_D 之值不得超过用户手册上规定的最大允许电流 I_{Dmax} , 以免二极管因过热而损坏。 $v_D > 0$ 的第一象限称为正向工作区; 当 $v_D < 0$ 时, 二极管处于反向工作区, 一开始, i_D 之绝对值甚小, 呈现很高的增量电阻; 当二极管反向电压之绝对值超过击穿电压 BV_R 后, 二极管工作于反向击穿区, i_D 之绝对值激增, 呈现很低的增量电阻。除专门用作稳压管的二极管外, 在大多数脉冲电路中, 是不允许二极管工作于击穿状态的, 以免因击穿而损坏器件。 $v_D < 0$ 的第三象限定义为反向工作区。

这样一来, 二极管作开关的两个可区分状态是二极管端电压 v_D 的函数, 当 $v_D > V_T$ 时, 二极管处于导通状态; 而当 $-BV_R < v_D \leq V_T$ 时, 二极管处于截止状态。

二极管静态伏-安特性还与工作温度有关, 当温度升高时, 第一象限的伏-安特性将向左移动, 无论对硅管或者锗管, 在恒定电流情况下, 二极管压降的温度系数均约为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。当温度增高时, 第三象限伏-安特性将向下移动, 对于硅管, 温度每升高 8°C , 反向电流增加一倍; 对于锗管, 温度每升高 10°C 时, 反向电流增加一倍。

为了定量地描述二极管开关的静态特性, 应将其器件的伏-安特性模型化。模型虽不等于实际的开关器件, 但却应描述其本质特性。由于描述的精度不同, 模型的复杂程度亦有所不同。图 1-2 示出理想二极管模型的伏-安特性。

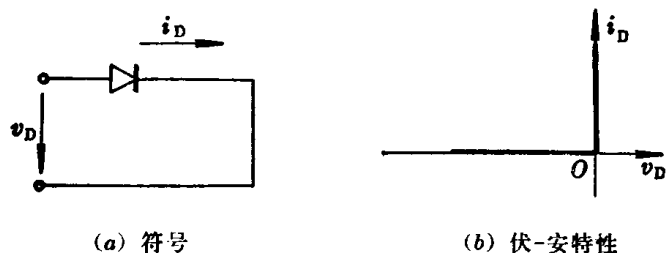


图 1-2 理想二极管模型

当 $v_D > 0$ 时, 二极管处于导通状态; 当 $v_D < 0$ 时, 二极管处于截止状态。

理想二极管模型常用来定性分析各种开关电路的基本工作原理。

1. 二极管非线性模型

这种模型逼近实际二极管的精度较理想二极管模型高, 且用一连续函数来描述工作状态, 便于数字计算机处理。

我们知道, 对于理想的 PN 结, 其伏-安特性可用下式描述:

$$i_{PN} = I_O (e^{v_{PN}/\varphi_T} - 1) \quad (1-1)$$

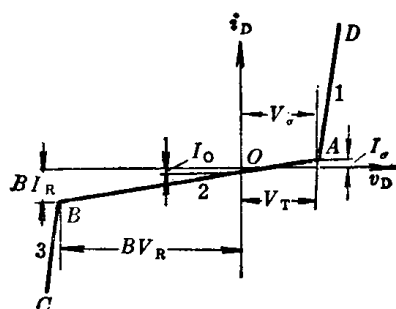
式中, i_{PN} 为流过 PN 结的正方向电流, I_O 为二极管反向饱和电流, φ_T 为温度电位, 在常温 (27°C) 下, φ_T 约为 26mV , v_{PN} 为 PN 结正向压降。

考虑到实际二极管存在体电阻 r_b 及漏电阻 r_R 后, 则二极管电流 i_D 可表示为

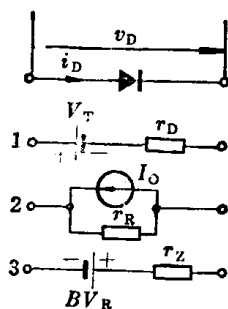
$$i_D = I_O [e^{(v_D - r_b i_D)/\varphi_T} - 1] + \frac{v_D}{r_R} \quad (1-2)$$

2. 二极管分段线性模型

这样的物理模型是用一个分段线性函数 (即一条折线) 来逼近实际的二极管伏-安特性, 如图 1-3 所示。



(a) 分段线性模型



(b) 分段线性等效电路

图 1-3 二极管分段线性模型

图中:

直线 DA (直线 1) 逼近二极管导通工作曲线;

直线 AB (直线 2) 逼近二极管截止工作曲线;

直线 BC (直线 3) 逼近二极管击穿工作曲线。

直线 1、2、3 可用式 (1-3) 的线性代数方程组描述如下:

$$\begin{aligned} v_D &= V_T + r_D i_D; & i_D > I_\sigma \\ i_D &= -I_O + \frac{v_D}{r_R}; & -BV_R < v_D < V_\sigma \\ v_D &= -BV_R + i_D r_Z; & i_D < -BI_R \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 V_σ, I_σ 表示导通折线段 DA 与截止折线段 AB 相交处 A 点对应的电压、电流值。

由式 (1-3) 确定的分区线性等效电路亦示于图 1-3(b)。

图 1-3(a) 的界限点 B 之坐标可由用户手册确定, 而界限点 A 的坐标确定如下:

由式(1-2),当二极管处于正向导通状态时,由漏电阻 r_R 引起的电流成分通常可忽略不计,则有

$$\frac{v_D}{r_R} \ll I_0 [e^{(v_D - r_b i_D)/\varphi_T} - 1]$$

又由于

$$e^{(v_D - r_b i_D)/\varphi_T} \gg 1$$

因而有

$$i_D \approx I_0 e^{(v_D - r_b i_D)/\varphi_T} \quad (1-4)$$

若令二极管处于导通状态时的电流为 I_D ,处于截止时的电流为 I_σ ,由式(1-4),有

$$V_\sigma = V_D - \varphi_T \ln \frac{I_D}{I_\sigma} - r_b (I_D - I_\sigma) \quad (1-5)$$

由前所述,为了使导通和截止两个状态成为可区分状态,应当满足如下关系:

$$\frac{I_D}{I_\sigma} \gg 1 \quad (1-6)$$

例如,设二极管体电阻 $r_b = 3 \Omega$,且 $\varphi_T = 26 \text{ mV}$,又若已知导通时之 $I_D = 1 \text{ mA}$, $V_D = 0.75 \text{ V}$,若令状态可区分比为

$$\frac{I_D}{I_\sigma} = 100$$

则由式(1-5),可得相应的 V_σ 为

$$V_\sigma = 0.75 - 26 \times 10^{-3} \ln 100 - 3(1 - 0.01) \times 10^{-3} \approx 0.63 \text{ V}$$

再由式(1-3)可得正向导通电阻 r_D 及门限电压 V_T 为

$$r_D = \frac{V_D - V_\sigma}{I_D - I_\sigma}, \quad V_T = V_\sigma - r_D I_\sigma \quad (1-7)$$

代入数据后算得 $r_D = 120 \Omega$, $V_T \approx 0.63 \text{ V}$ 。

仍对上例,又设 $I_D = 10 \text{ mA}$, $V_D = 0.84 \text{ V}$,计算可知, $r_D \approx 12 \Omega$, $V_T \approx 0.69 \text{ V}$ 。

通过上述计算不难看出,对于不同的导通电流 I_D ,其门限电压 V_T 不是固定不变的,但变化范围并不太大。通常认为,对于硅材料制成的小功率开关二极管, V_T 之值为

$$V_T \approx 0.6 \sim 0.7 \text{ V} \quad (1-8)$$

而导通电阻 r_D 变化却是很大的。

由于实际的开关二极管的漏电阻 r_R 远大于正向导通电阻 r_D ,正向导通电流 I_D 远大于反向

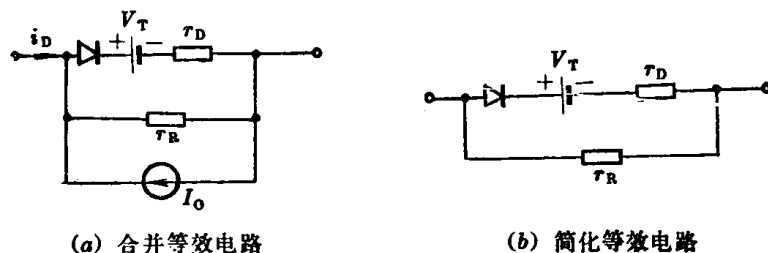


图 1-4 二极管合并在一起的分段等效电路

漏电流 I_0 ，若利用理想二极管模型，可将图 1-3(b) 所示的导通及截止两段的分区等效电路加以合并，合并后的分段线性等效电路示于图 1-4(a)，在作近似计算时，常用图 1-4(b) 所示的简化等效电路。

应当指出，分段线性二极管模型在原点附近与实际的伏-安特性相比较，误差较大。但是，由于这种模型在作近似工程计算时比较方便，应用仍很广泛。

例1-1 对于图 1-5 所示的两种二极管开关电路，利用分段线性模型，试计算二极管导通时，输入信号 v_I 的门限值 $V_{I.T}$ 。

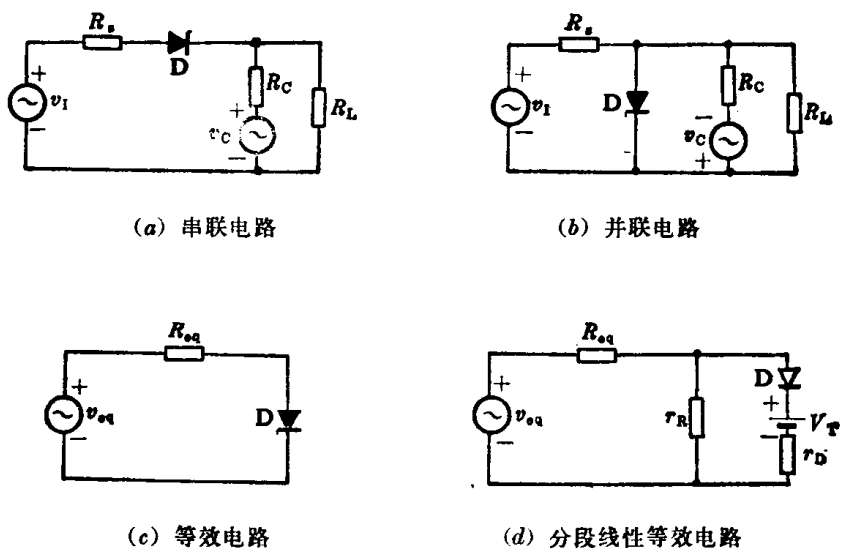


图 1-5 二极管开关电路实例 1-1

解 对于图 1-5 所示的二极管开关电路，设 v_C 为控制信号。对于图(a)所示的串联开关电路及图(b)所示的并联开关电路，利用电路定理，均可作出图(c)所示的等效电路。图中，令 R_{eq} 为等效电阻， v_{eq} 为等效电压源。

对于图(a)所示的电路，有

$$R_{eq} = R_s + (R_L \parallel R_C)$$

$$v_{eq} = v_I - v_C \frac{R_L}{R_C + R_L}$$

对于图(b)所示的电路，有

$$R_{eq} = (R_s^{-1} + R_C^{-1} + R_L^{-1})^{-1}$$

$$v_{eq} = R_{eq} \left(\frac{v_I}{R_s} - \frac{v_C}{R_C} \right)$$

将二极管用分段线性等效电路所置换，得图(d)所示的等效电路，当其二极管电压为

$$v_D = \frac{r_R}{R + r_R} v_{eq} = V_T$$

时，便可求出输入信号的门限值 $V_{I.T}$ 。

对于图(a)所示的电路，有