

 电子信息与电气学科规划教材 · 电子电气基础课程

数字电路与系统

(第3版)

戚金清 王兢 主编
王开宇 唐洪 龚晓峰 陈晓明 编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

数字电路与系统

(第3版)

戚金清 王 兢 主编

王开宇 唐 洪 龚晓峰 陈晓明 编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

数字电子技术是信息、通信、计算机、控制等领域工程技术人员必须掌握的基本理论和技能。本书主要讲解数字逻辑基础, 逻辑门电路, 逻辑代数基础, 组合逻辑电路, 触发器, 时序逻辑电路, 脉冲波形的产生与变换, 数字系统设计基础, 数模与模数转换, 半导体存储器及可编程逻辑器件, 硬件描述语言 Verilog HDL 等内容。全书包含大量例题和习题, 便于学生理解所学概念。

本书不仅是一本面向信息与电气大类专业的本科生基础课教材, 而且是电类工程技术人员的合适参考用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字电路与系统 / 戚金清, 王兢主编; 王开宇等编. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2016.3

电子信息与电气学科规划教材. 电子电气基础课程

ISBN 978-7-121-28055-9

I. ①数… II. ①戚… ②王… ③王… III. ①数字电路—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 007703 号

策划编辑: 窦 昊

责任编辑: 窦 昊

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.75 字数: 505.6 千字

版 次: 2007 年 1 月第 1 版

2016 年 3 月第 3 版

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

第3版序

本书在《数字电路与系统》第1版、第2版的基础上修订而成。在总结四年多来使用本书教学和学习经验的基础上，对本书进行了部分提高、增删和修改。为保持数字电路基本知识和基础理论的连贯性，同时适应信息科学的迅速发展，本书主要保留了有关数制、逻辑代数、触发器原理、组合逻辑电路、时序逻辑电路、模数数模转换等原有的基本内容。本次修订将硬件描述语言由VHDL换成了Verilog HDL，应用更广泛、更方便，也使读者能更深入地理解数字电路在后续课程中的应用，为面向业界的工程应用人才培养奠定基础。

本书在原书基础上的具体修改包括：（1）在第1章中增加了对模拟信号、数字信号、模拟电路及数字电路等的图文介绍；（2）重新调整了第5章的结构，在介绍触发器电路结构的基础上，强调了触发器的逻辑功能，突出了触发器的触发方式；（3）第11章硬件描述语言由VHDL换成了Verilog HDL，章节内容全部修改；（4）全书各章增加或修订了部分例题及习题。

目录中有“*”号的部分是建议选讲的内容。在学时较少的情况下，可以删减这些内容，作为感兴趣同学的自学内容。删去这些内容不会影响本书理论体系的完整性和内容的连贯性。

参加本次修订工作的人员包括：唐洪（第1、3章），戚金清（第2、5、10章），龚晓峰（第4章），王开宇（第6章），王兢（第7、8、9章），陈晓明（第11章）。全书由戚金清和王兢统稿、定稿。作者向参与原书写作的李小兵和高仁璟老师表示衷心的感谢，向为本课程教学大纲提出宝贵意见的蔡惟曾教授表示真诚的感谢，向帮助本书修订、出版的同事们致以诚挚的谢意。

修订后的教材中一定还会存在一些不妥和不完善之处，恳求读者批评指正。

编 者

2015年10月

目 录

第 1 章 数字逻辑基础	1
1.1 模拟信号	1
1.2 数字信号	2
1.3 模拟电路与数字电路	2
1.4 数制	4
1.5 数制间的转换	6
1.5.1 任意进制转换成十进制	6
1.5.2 十进制转换成任意进制	6
1.5.3 二进制与八进制间的转换	7
1.5.4 二进制与十六进制间的转换	8
1.6 代码	8
1.6.1 二十进制代码	8
1.6.2 格雷码	9
1.6.3 字符代码	9
1.7 二进制代码的表示法	10
1.8 带符号二进制数的表示法	10
1.8.1 二进制正数表示法	10
1.8.2 二进制负数表示法	10
*1.8.3 带符号二进制数的运算	11
1.9 偏移码	12
习题	12
第 2 章 逻辑门电路	14
2.1 概述	14
2.2 逻辑门电路介绍	14
2.2.1 基本逻辑门电路	14
2.2.2 复合逻辑门电路	15
2.3 TTL 集成门电路	17
2.3.1 TTL 集成电路概述	17
2.3.2 TTL 与非门	18
2.3.3 TTL 与非门的电气特性	20
2.3.4 其他类型 TTL 门电路	22
2.3.5 TTL 电路的改进系列	27

2.4	MOS 门电路	28
2.4.1	NMOS 门电路	28
2.4.2	CMOS 电路	30
2.4.3	CMOS 电路特点	32
2.4.4	集成电路使用注意事项	32
*2.5	TTL 与 CMOS 电路的连接	33
*2.6	TTL、CMOS 常用芯片介绍	34
	习题	35
第 3 章	逻辑代数基础	41
3.1	逻辑代数运算法则	41
3.1.1	基本逻辑运算	41
3.1.2	逻辑代数的基本定律	42
3.1.3	逻辑代数的基本规则	42
3.1.4	逻辑代数常用公式	43
3.2	逻辑函数的标准形式	43
3.2.1	最小项和标准与或式	43
3.2.2	最大项和标准或与式	45
3.2.3	最大项与最小项的关系	46
3.3	逻辑函数的公式化简法	47
3.4	逻辑函数的卡诺图化简法	48
3.4.1	卡诺图	48
3.4.2	用卡诺图表示逻辑函数	49
3.4.3	用卡诺图化简逻辑函数	49
3.4.4	具有随意项的逻辑函数化简	51
3.4.5	引入变量卡诺图	52
	习题	53
第 4 章	组合逻辑电路	59
4.1	组合逻辑电路分析	59
4.2	组合逻辑电路设计	60
4.3	编码器	63
4.3.1	普通编码器	63
4.3.2	优先编码器	64
4.4	译码器	67
4.4.1	二进制译码器	67
4.4.2	码制变换译码器	70
4.4.3	显示译码器	71
4.5	数据选择器	75
4.5.1	数据选择器	75

4.5.2	数据选择器实现逻辑函数	76
4.6	数值比较器	78
4.6.1	一位数值比较器	79
4.6.2	四位数值比较器 7485	79
4.6.3	数值比较器的位数扩展	80
4.7	加法电路	80
4.7.1	半加器	81
4.7.2	全加器	81
4.7.3	超前进位加法器 74283	82
*4.8	组合逻辑电路的竞争冒险	84
4.8.1	竞争冒险的分类与判别	84
4.8.2	竞争冒险消除方法	85
	习题	86
第 5 章	触发器	92
5.1	电平触发的触发器	92
5.1.1	由与非门构成的基本 RS 触发器	92
5.1.2	时钟触发器	96
5.2	脉冲触发的触发器	100
5.2.1	主从 RS 触发器	100
5.2.2	主从 JK 触发器	101
5.3	边沿触发的触发器	105
5.3.1	TTL 边沿触发器	105
5.3.2	CMOS 边沿触发器	107
5.4	触发器的分类和区别	110
*5.5	触发器之间的转换	112
5.6	触发器的典型应用	112
	习题	114
第 6 章	时序逻辑电路	119
6.1	时序逻辑电路的基本概念	119
6.1.1	时序逻辑电路的结构及特点	119
6.1.2	时序逻辑电路的分类	120
6.1.3	时序逻辑电路的表示方法	120
6.2	同步时序逻辑电路的一般分析方法	121
6.3	同步时序逻辑电路的设计	124
6.4	计数器	131
6.4.1	4 位二进制同步集成计数器 74161	131
6.4.2	8421BCD 码同步加法计数器 74160	133
6.4.3	同步二进制加法计数器 74163	134

6.4.4	二-五-十进制异步加法计数器 74290	134
6.4.5	集成计数器的应用	135
6.5	寄存器	140
6.5.1	寄存器 74175	140
6.5.2	移位寄存器	141
6.5.3	集成移位寄存器 74194	143
6.5.4	移位寄存器构成的移位型计数器	144
*6.6	序列信号发生器	147
6.6.1	计数型序列信号发生器	147
6.6.2	移位型序列信号发生器	147
	习题	150
第 7 章	脉冲波形的产生与变换	155
7.1	555 定时器	155
7.2	施密特触发器	156
7.2.1	555 定时器构成的施密特触发器	156
7.2.2	门电路构成的施密特触发器	157
7.2.3	集成施密特触发器	159
7.2.4	施密特触发器的应用	159
7.3	单稳态触发器	161
7.3.1	TTL 与非门组成的微分型单稳态触发器	161
7.3.2	555 定时器构成的单稳态触发器	163
7.3.3	集成单稳态触发器	164
7.3.4	单稳态触发器的应用	166
7.4	多谐振荡器	169
7.4.1	555 定时器构成的多谐振荡器	169
7.4.2	TTL 与非门构成的多谐振荡器	171
7.4.3	石英晶体振荡器	173
7.4.4	施密特触发器构成的多谐振荡器	173
7.4.5	多谐振荡器的应用	175
	习题	176
第 8 章	数字系统设计基础	180
8.1	数字系统概述	180
8.1.1	数字系统结构	180
8.1.2	数字系统的定时	180
8.1.3	数字系统设计的一般过程	181
8.2	算法状态机——ASM 图表	181
8.2.1	ASM 图表符号	181
8.2.2	ASM 图表的含义	183

8.2.3	ASM 图表的建立	184
8.3	数字系统设计	185
	习题	193
第 9 章	数模与模数转换	196
9.1	数模转换电路	196
9.1.1	数模转换关系	196
9.1.2	权电阻网络 DAC	197
9.1.3	R-2R 梯形电阻网络 DAC	198
9.1.4	R-2R 倒梯形电阻网络 DAC	199
9.1.5	电流激励 DAC	200
9.1.6	集成数模转换电路	200
9.1.7	数模转换的主要技术指标	205
9.2	模数转换电路	207
9.2.1	ADC 的工作过程	207
9.2.2	并行比较 ADC	209
9.2.3	并/串型 ADC	211
9.2.4	逐次逼近型 ADC	212
9.2.5	双积分 ADC	214
9.2.6	集成模数转换电路	216
9.2.7	模数转换的主要技术指标	218
	习题	219
第 10 章	半导体存储器及可编程逻辑器件	223
10.1	半导体存储器概述	223
10.1.1	半导体存储器的分类	223
10.1.2	存储器的技术指标	224
10.2	随机存储器 RAM	224
10.2.1	RAM 的基本结构	225
10.2.2	RAM 芯片简介	228
10.2.3	RAM 的容量扩展	229
10.3	只读存储器 ROM	231
10.3.1	ROM 的分类	231
10.3.2	ROM 的结构与基本原理	232
10.3.3	ROM 应用	233
10.4	可编程逻辑器件 PLD	236
10.4.1	可编程逻辑器件概述	236
10.4.2	可编程逻辑器件的基本结构和电路表示方法	237
10.4.3	复杂可编程逻辑器件 CPLD	239
10.4.4	现场可编程门阵列 FPGA	243

10.4.5 CPLD/FPGA 设计方法与编程技术	247
习题	250
第 11 章 硬件描述语言 Verilog HDL	256
11.1 Verilog HDL 的基本知识	256
11.1.1 什么是 Verilog HDL	256
11.1.2 Verilog HDL 的发展历史	256
11.1.3 Verilog HDL 程序的基本结构	257
11.2 Verilog HDL 的基本元素	259
11.2.1 注释符	259
11.2.2 标识符	260
11.2.3 关键字	260
11.2.4 间隔符	260
11.2.5 操作符	260
11.2.6 数据类型	264
11.3 Verilog HDL 的基本语句	269
11.3.1 过程结构语句	269
11.3.2 语句块	271
11.3.3 时序控制	272
11.3.4 赋值语句	273
11.3.5 分支语句	274
11.3.6 循环语句	275
11.4 Verilog HDL 程序设计实例	277
11.4.1 基本逻辑门电路设计	277
11.4.2 组合逻辑电路设计	280
11.4.3 时序逻辑电路设计	286
11.4.4 数字系统设计实例	291
11.5 Verilog HDL 的模拟仿真	294
11.5.1 Quartus II 开发软件	294
11.5.2 仿真实例	296
习题	303
参考文献	304

第 1 章 数字逻辑基础

1.1 模拟信号

自然界中有许多物理量是模拟的。它们在时间域是连续变化的，其幅度是一定范围的任意实数值。人们称这些连续变化的物理量为模拟量。表示模拟量的信号就是模拟信号。比如某一天的气温是一个模拟信号，如图 1.1(a)所示。气温在凌晨达到最低值，随后逐渐升高；在午后达到最高值，随后逐渐下降。电力线中的交流电压值，也是一个模拟信号，如图 1.1(b)所示，以 220 伏的幅值、50 赫兹的频率周期性地变化。以人体为信号源，心电、心音等都是模拟信号，如图 1.1(c)(d)所示。门铃发出的“叮咚”声，是一种机械振动，是模拟电压信号，如图 1.1(e)所示。

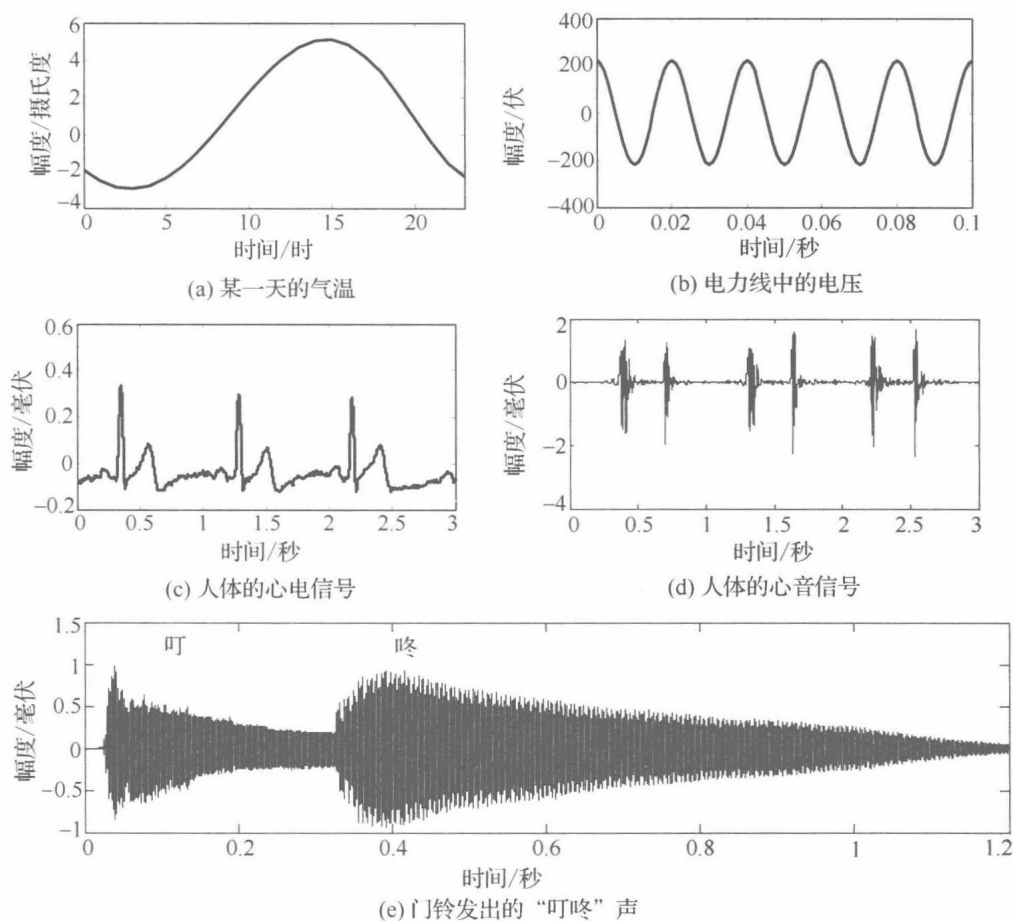


图 1.1 几个模拟信号的实例

1.2 数字信号

自然界中除了模拟量外，还有另外一些物理量在幅度上是离散的。它们的幅度只是有限集合中的某一个。这样的物理量称为数字量。表示数字量的信号，称为数字信号。比如开关的状态是数字信号，有“开”和“关”两个值。电灯的状态是数字信号，有“亮”和“灭”两个值。二极管的工作状态是数字信号，只能是“导通”和“截止”两个状态。算盘是中国古代的计算工具。算盘表示的数值，是数字信号，因为算盘上每个算珠的位置是有限的，表示的数值精度也是有限的。汉字是由有限个字（字符）组成的，因此汉字也可以认为是数字信号。除了自然界的数字信号，人们在科学研究中常常人为地制造出数字信号，比如通信中的数字调制信号，信号的发送端每次发射的符号是有限符号集中的某一个。QPSK 每次发送 4 个符号中的一个，16QAM 每次发送 16 个符号中的一个。图 1.2 为几个数字信号的实例。

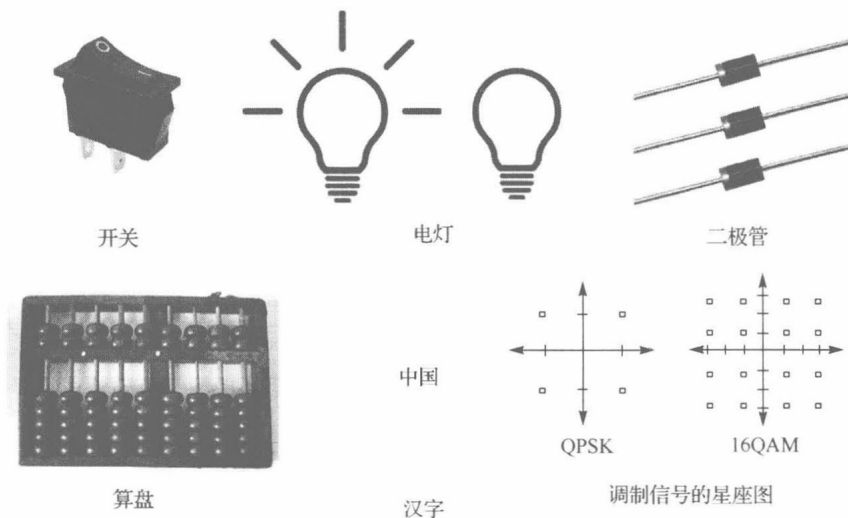


图 1.2 几个数字信号的实例

1.3 模拟电路与数字电路

模拟电路中的各个环节均处理模拟信号。构成模拟电路的元器件主要有电阻、电容、电感。随着制造工艺的进步，20 世纪初成功地制造出了电子管，从此模拟电路能够完成功率放大、产生振荡等功能。结合模拟电路理论，模拟电路可进行算术运算、微积分运算，以至于最终造出了模拟计算机，实现了当时人们进行计算机仿真的愿望。然而，随着科技的飞速发展，许多军用和民用科学研究迫切需要进行大量快速计算，模拟计算机表现出显著的局限性，不能满足人们日益增长的需求。主要表现为：（1）体积庞大、笨重、功耗高。电子管是在气密性封闭容器（一般为玻璃管）内利用电场对真空中的电子流作用以获得信号放大或振荡的。复杂的电路中，众多电子管在一起，必然体积庞大。在出现晶体管后，模拟电路的体积大大减小。但是，与集成电路比起来，模拟电路在体积和功耗上仍然不可比拟。（2）可靠性差，容易受干扰。模拟电路的干扰源较多，如电压不稳定、元器件

之间的耦合和非线性等。(3) 模拟电路的数值计算能力弱, 不能满足复杂科学计算的需要。

数字技术早在 19 世纪末就已经有了工程应用, 比如电报就是一个简单的二值数字系统。在 1846 年英国数学家 George Boole 创立了布尔代数, 从此数字逻辑电路有了分析方法和设计方法, 为数字技术的后来发展奠定了理论基础。数字电路最初也经历了电子管时期, 由电子管的导通和截止来表示数字信号。1946 年出现的第一台电子计算机就是以电子管为基本元件制成的。但是, 由于当时电子管性能指标的缺陷, 这台计算机故障频发。从 20 世纪 60 年代开始, 由于半导体制造工艺的突破, 晶体管诞生了。由于晶体管体积小、功耗低、工作速度快、工作寿命长等特点, 数字电路的体积大大缩小, 有了小规模数字电路。从此, 数字电路的发展进入了快车道。到了 20 世纪 70 年代末, 出现了集成电路, 可以把成千上万的晶体管、电阻等元器件制造在一块面积很小的芯片上, 并且价格大幅度下降, 性能大幅度上升, 数字技术开始进入国民经济的各行各业中。进入 20 世纪 80 年代后, 大规模、超大规模集成电路的生产技术成熟, 工作性能等指标取得突破性进展, 微处理器诞生, 除了在各学科领域得到广泛使用外, 还深入到人们生活的各个方面。进入 21 世纪, 数字技术和产品已经成为人们生活中不可缺少的一部分, 比如微型计算机、笔记本电脑、智能手机、数码相机。这些数字产品与人们朝夕相处, 形影不离。数字技术伴随着人类迈进信息社会的每一个步伐。

回顾模拟电路与数字电路的发展历程不难看出, 数字电路与模拟电路相比, 具有以下一些优点:

- (1) 集成度高、功耗低、计算能力强;
- (2) 抗干扰能力强, 工作可靠;
- (3) 功能多样化, 适应性强。

环顾我们身边的各种电路与系统, 可以发现, 少有系统是全模拟电路构成的, 也少有系统是全数字电路构成的。一般地讲, 在一个系统中模拟电路与数字电路各司其职, 紧密配合共同完成设计者指定的任务。我们以最简单的语音记录和回放系统为例, 介绍模拟电路与数字电路的关系, 如图 1.3 所示。麦克风将语音引起的空气振动转换为模拟电信号, 幅度通常为毫伏级。经过放大器, 放大到伏级, 为模数转换做准备。这一部分的处理是由模拟电路完成的。模拟信号经过 A/D 转换变成数字信号, 存储在存储器中。此时, 录音的任务已经完成。如果需要回放记录的语音, 需要从存储器中读取数字信号, 经过数模转换变成模拟信号。再经过功率放大, 由扬声器播放出来。播放任务中的放大器及扬声器是由模拟电路完成的。而控制器的任务是进行状态转换。比如, 系统处于录音状态, 那么控制器发出指令使得麦克风、放大器、A/D 转换、存储器处于工作状态; 如果系统处于回放状态, 那么控制器发出指令, 使得存储器、D/A 转换、功率放大器、扬声器处于工作状态。可见, 这个录音回放系统, 仅仅靠模拟电路是无法完成工作的, 仅仅靠数字电路也是无法完成工作。只有在前端的模拟电路、中间的数字电路和后端的模拟电路共同配合下才能完成任务。

语音记录和回放系统的原理图向我们展示出, 模拟电路与数字电路的联系纽带是模数转换 (A/D)、数模转换 (D/A), 如图 1.4 所示。因此, 有人形象地将模拟电路、模数转换/数模转换、数字电路三者之间的关系比喻成一个鸡蛋。模拟电路像蛋壳, 数字电路像蛋黄, 而 A/D 转换像介于蛋壳与蛋黄之间的蛋清。三者紧密联系在一起, 完成设计给定的任务。

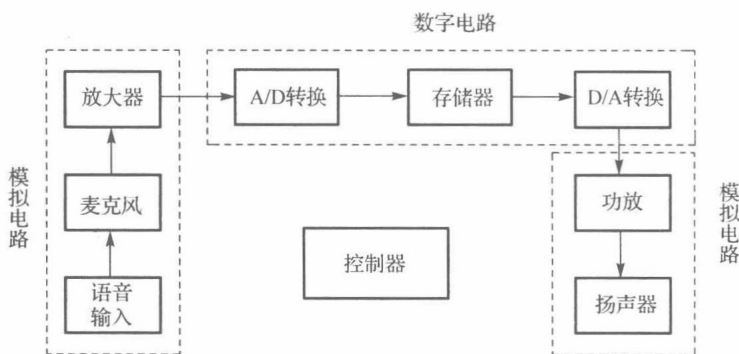


图 1.3 语音记录回放系统的原理图



图 1.4 模数转换/数模转换是模拟电路与数字电路的联系纽带

语音记录与回放系统是一个完整的数字系统。本教材的教学内容是围绕着数字系统的各个组成部分逐步展开的。首先介绍了数制转换及代码、基本逻辑门、逻辑代数，是分析和设计数字系统的基础部分；然后介绍组合逻辑电路和时序逻辑电路，是设计控制器的工具；接着是脉冲波形的产生与变换，数字系统的设计方法，数模转换和模数转换，半导体存储器，最后介绍数字系统的设计语言。下面就从数字电路的基本知识数制与编码开始。

1.4 数制

按照进位规则进行计数，即进位的制度，称为数制。一个数制所包含的数字符号的个数称为该数制的基数（radix）。人们在日常生活中使用的是十进制，有时也采用十二进制、二十四进制、六十进制，比如用于计时的时钟。而在数字系统中多采用二进制，有时也采用八进制或十六进制。

1. 十进制（Decimal）

十进制有 10 个数字符号：0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9，基数为 10，逢 10 进 1，即 $9 + 1 = 10$ 。任何一个十进制数都可以用这 10 个代码按一定规律排列起来表示。一个数的大小由它的数码大小和数码所在的位置决定。每个数码所处的位置称为“权”。权由基数的乘方表示，十进制数的权由 $10^0, 10^1, 10^2, \dots$ 以及 $10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, \dots$ 表示。例如 8596.41 按权展开为

$$(8596.41)_{10} = 8 \times 10^3 + 5 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 6 \times 10^0 + 4 \times 10^{-1} + 1 \times 10^{-2}$$

数字电路的计数规则一般不直接采用十进制，因为构成计数电路的基本思路是把电路的状态与数码对应起来，如果采用十进制，则需要有 10 个不同的电路状态来与之对应，从而会使数字电路的结构复杂，错误概率增大，工作可靠性变差。数字电路通常采用二进制进行计数。

2. 二进制 (Binary)

二进制的基数为 2，只有两个数码 0 和 1，逢 2 进 1，即 $1 + 1 = 10$ 。二进制数各位的权为基数 2 的乘方（见表 1.1）。

表 1.1 二进制数的权

二进制 位数	权	十进制 表示	二进制 位数	权	十进制 表示	二进制 位数	权	十进制 表示
12	2^{11}	2048	6	2^5	32	-1	2^{-1}	0.5
11	2^{10}	1024	5	2^4	16	-2	2^{-2}	0.25
10	2^9	512	4	2^3	8	-3	2^{-3}	0.125
9	2^8	256	3	2^2	4	-4	2^{-4}	0.062 5
8	2^7	128	2	2^1	2	-5	2^{-5}	0.031 25
7	2^6	64	1	2^0	1	-6	2^{-6}	0.015 625

二进制数 $(101101.101)_2$ 可表示为

$$(101101.101)_2 = 1 \times 2^5 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-3}$$

数字电路中通常采用二进制，是因为二进制数只有 0 和 1 两个数码，正好对应于低电平和高电平两种电路状态。

3. 八进制 (Octal)

八进制的基数为 8，有 8 个数码 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7，逢 8 进 1，即 $7+1=10$ 。八进制数各位的权为基数 8 的乘方。例如，八进制数 $(374.25)_8$ 按权展开为

$$(374.25)_8 = 3 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 4 \times 8^0 + 2 \times 8^{-1} + 5 \times 8^{-2}$$

4. 十六进制 (Hexadecimal)

十六进制的基数为 16，有 16 个数码 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F，其中 A~F 分别表示 10~15，逢 16 进 1，即 $F+1=10$ 。各位的权为 16 的乘方。例如，十六进制数 $(D5E8.A3)_{16}$ 按权展开为

$$(D5E8.A3)_{16} = 13 \times 16^3 + 5 \times 16^2 + 14 \times 16^1 + 8 \times 16^0 + 10 \times 16^{-1} + 3 \times 16^{-2}$$

5. 任意进制

r 进制的基数为 r ，有 r 个数码 0, 1, 2, ..., $(r-1)$ ，逢 r 进 1。各位的权为 r 的乘方。一个 r 进制数 N 可以按权展开为

$$\begin{aligned} (N)_r &= k_{n-1}r^{n-1} + k_{n-2}r^{n-2} + \cdots + k_1r^1 + k_0r^0 + k_{-1}r^{-1} + k_{-2}r^{-2} + \cdots + k_{-m}r^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} k_i r^i \end{aligned}$$

式中， n 为整数部分的位数， m 为小数部分的位数， r^i 为各位的权， k_i 为系数，是各位的数码。注意，整数部分从右向左第 n 位的权为 r^{n-1} ，系数为 k_{n-1} ；小数部分从左向右第 m 位的权为 r^{-m} ，系数为 k_{-m} 。

例如，七进制数 $(345.61)_7$ 按权展开为

$$(345.61)_7 = 3 \times 7^2 + 4 \times 7^1 + 5 \times 7^0 + 6 \times 7^{-1} + 1 \times 7^{-2}$$

表 1.2 列出十进制数 0~17 及其对应的二进制数、八进制数和十六进制数。

表 1.2 几种数制之间的关系对照表

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
0	00000	0	0
1	00001	1	1
2	00010	2	2
3	00011	3	3
4	00100	4	4
5	00101	5	5
6	00110	6	6
7	00111	7	7
8	01000	10	8
9	01001	11	9
10	01010	12	A
11	01011	13	B
12	01100	14	C
13	01101	15	D
14	01110	16	E
15	01111	17	F
16	10000	20	10
17	10001	21	11

1.5 数制间的转换

1.5.1 任意进制转换成十进制

从 1.5 节可以看出，各种进制数按权展开就已经完成了各种进制向十进制的转换。

【例 1.1】将二进制数 $(101011.011)_2$ 转换为十进制数。

解： $(101011.011)_2 = (1 \times 2^5 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3})_{10} = (43.375)_{10}$

【例 1.2】将八进制数 $(1047.5)_8$ 转换为十进制数。

解： $(1047.5)_8 = (1 \times 8^3 + 4 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 5 \times 8^{-1})_{10} = (551.625)_{10}$

【例 1.3】将十六进制数 $(A6.C)_{16}$ 转换为十进制数。

解： $(A6.C)_{16} = (10 \times 16^1 + 6 \times 16^0 + 12 \times 16^{-1})_{10} = (166.75)_{10}$

1.5.2 十进制转换成任意进制

转换原则如下：将十进制数的整数部分除以 r 取余数，直到商为 0，将余数逆序排列，得到 r 进制数的整数部分；将十进制数的小数部分乘以 r ，取出乘积的整数部分，剩下的小

数部分继续乘以 r ，直到满足精度要求为止，将乘积的整数部分顺序排列获得 r 进制数的小数部分。

【例 1.4】将十进制数 45.28 转换成二进制数（取 4 位小数）。

解：

$\begin{array}{r} 2 \overline{) 45} \quad \dots\dots 1 \\ \underline{22} \\ 2 \overline{) 22} \quad \dots\dots 0 \\ \underline{11} \\ 2 \overline{) 11} \quad \dots\dots 1 \\ \underline{5} \\ 2 \overline{) 5} \quad \dots\dots 1 \\ \underline{2} \\ 2 \overline{) 2} \quad \dots\dots 0 \\ \underline{1} \\ 2 \overline{) 1} \quad \dots\dots 1 \\ \underline{0} \end{array}$ 商 余 低位 高位 0	0.28 $\begin{array}{r} \times 2 \\ \hline 0 \leftarrow (0).56 \\ \times 2 \\ \hline 1 \leftarrow (1).12 \\ \times 2 \\ \hline 0 \leftarrow (0).24 \\ \times 2 \\ \hline 0 \leftarrow (0).48 \end{array}$ 高位 低位 0
--	---

所以 $(45.28)_{10} = (101101.0100)_2$ 。

【例 1.5】将十进制数 348.27 转换成八进制数（取两位小数）。

解：

$\begin{array}{r} 8 \overline{) 348} \quad \dots\dots 4 \\ \underline{43} \\ 8 \overline{) 43} \quad \dots\dots 3 \\ \underline{5} \\ 8 \overline{) 5} \quad \dots\dots 5 \\ \underline{0} \end{array}$ 低位 高位 0	0.27 $\begin{array}{r} \times 8 \\ \hline 2 \leftarrow (2).16 \\ \times 8 \\ \hline 1 \leftarrow (1).28 \end{array}$ 高位 低位 1
---	---

所以 $(348.27)_{10} = (534.21)_8$ 。

【例 1.6】将十进制数 4021.78 转换成十六进制数（取两位小数）。

解：

$\begin{array}{r} 16 \overline{) 4021} \quad \dots\dots 5 \\ \underline{251} \\ 16 \overline{) 251} \quad \dots\dots 11 \\ \underline{15} \\ 16 \overline{) 15} \quad \dots\dots 15 \\ \underline{0} \end{array}$ 低位 高位 0	0.78 $\begin{array}{r} \times 16 \\ \hline 468 \\ 78 \\ \hline 12 \leftarrow (12).48 \\ \times 16 \\ \hline 288 \\ 48 \\ \hline 7 \leftarrow (7).68 \end{array}$ 高位 低位 7
---	---

所以 $(4021.78)_{10} = (\text{FB}5.\text{C}7)_{16}$ 。

1.5.3 二进制与八进制间的转换

八进制数的基数 8 是 2 的幂，即 $8 = 2^3$ ，因此可用三位二进制数表示一位八进制数。将二进制数转换成八进制数时，以小数点为界，向左、右两侧每三位分成一组（不够三位添 0），每组转换为一位八进制数。