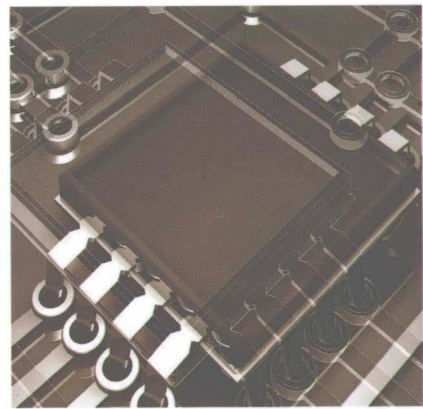




高等院校电类专业基础课规划教材

模拟电子电路

曹才开 刘辉 汤群芳 曹帅 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

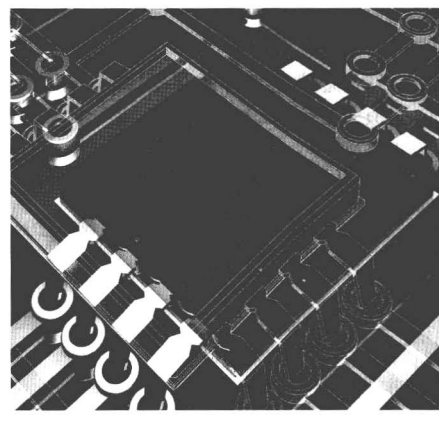


高等院校电子专业基础课规划教材

模拟电子电路

曹才开 刘辉 汤群芳 曹帅 编著

常州大学图书馆
藏书章



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是根据教育部颁布的高等工业学校“电子技术(电子技术I)”课程的基本要求,由湖南省高校电子技术教学研究会组织省内部分高等院校教师在多年教学研究和教材建设的基础上编写而成的。

本书系统地介绍了模拟电子电路的基本概念,电子器件的结构和特性,各类基本模拟电子电路的组成、特点、分析方法和在电子工程中的应用,以及模拟电子电路的仿真实验。具体内容包括半导体元器件、放大电路基础、功率放大电路、集成运算放大器与运算电路、负反馈放大电路、信号处理电路、信号产生电路、直流稳压电源、晶闸管电路、EWB简介与模电仿真实验项目。

除“*”号章节内容外,适用讲课学时为60学时左右。

本书每章有小结和习题,书末提供了部分习题答案,便于教学与自学。附录中列出了常用模拟集成电路芯片,便于工程应用。

本书可作为自动化、电气及其自动化、电子信息工程、通信工程、仪表与测量等电类各本科专业“模拟电子技术”课程的教材,也可供有关电子工程技术人员参考。

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

模拟电子电路/曹才开等编著. —北京:电子工业出版社,2013.2
高等院校电类专业基础课规划教材
ISBN 978-7-121-19207-4

I. ①模… II. ①曹… III. ①模拟电路-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第295327号

策划编辑:束传政

责任编辑:束传政

特约编辑:王 纲

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:北京市李史山胶印厂

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:502千字

印 次:2013年2月第1次印刷

印 数:4000册 定价:38.00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,联系及购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。

前 言

电子技术是研究电子元器件及电路系统的设计、分析及制造的工程实用技术。目前电子技术主要由模拟电子技术和数字电子技术两部分组成，而模拟电子技术又可分为低频模拟电子技术和高频模拟电子技术两部分。本书只研究低频模拟电子技术。

模拟电子技术是一门研究对模拟（连续）信号进行处理的模拟电路的学科，它包括三部分内容：基本半导体电子元器件、基本模拟电子电路，以及模拟电路的工程与实践。

全书内容共有 11 章。第 1 章主要介绍信号、电子系统和放大电路的基本概念，为全书奠定相关基础知识。第 2 章介绍模拟电路中基本元器件，半导体的基本知识，二极管、三极管、场效应管等半导体元器件，奠定模拟电子电路的元器件基础。

第 3~8 章主要介绍各种基本放大电路、功率放大电路、集成运算放大器及其基本运算电路、负反馈放大电路、信号处理电路、信号产生电路。这部分总体属于信号处理电路，即电流、电压、功率放大，信号运算，信号产生，波形变换等基本功用电路。

第 9~10 章主要介绍直流电源电路，即把交流电变为直流电。第 9 章把交流电变为直流电，其输出直流电压值是不可控的；而第 10 章把交流电变为直流电，其输出直流电压值是可控的。

第 11 章主要介绍 Electronics Workbench（电子工作平台，简称 EWB）软件的基本功用、工作界面和操作方法，然后在 EWB 软件平台上设计 5 个 EWB 仿真实验项目。

本教材特色如下：

- ① 精选本课程基本内容，理论知识以够用为度；以电路工作原理为主，尽量简化计算。
- ② 正确处理分立元件电路与集成电路的关系：当逐步引入集成电路新技术的同时，适当减少分立元件电路原理的内容，兼顾分立电路基本原理与集成技术以实现原则的统一。
- ③ 加强实践环节和工程应用。每章均有实际工程应用电路，有关模拟电子电路的工艺、电路调整、电路测试等带工程经验性质的内容均有详细介绍。最后，介绍模拟电子电路的 EWB 仿真方法。
- ④ 每章有习题，并附有部分参考答案，便于自学与教学。

本书由湖南工学院曹才开教授担任主编和统稿工作。参加本书编写工作的有：曹才开（第 1~4 章，附录 A、B，习题答案）；长沙学院刘辉（第 5、6 章）；湖南工学院汤群芳（第 7、8 章）；湖南工学院曹帅（第 9、10 章）；辽宁科技学院郭瑞平（第 11 章）；湖南工学院李旭华、俞斌、冯国珍参加本书资料收集、文字校对等工作。

在本书的编写过程中，得到了湖南省高校电子技术教学研究会和参编学校的大力支持，谨致以衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请各位读者提出宝贵意见。

编者
2012 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 信号的基本概念	2
1.2.1 信号的定义	2
1.2.2 信号的分类	3
1.2.3 信号的频谱	5
1.3 电子系统的基本概念	8
1.3.1 系统的分类	8
1.3.2 电子系统的基本结构	10
1.4 放大电路的基本概念	11
1.4.1 放大电路的组成	11
1.4.2 放大电路的主要性能指标	12
本章小结	15
习题 1	15
第 2 章 半导体元器件	17
2.1 认识模拟电路中的基本元器件	17
2.1.1 电阻元件	17
2.1.2 电容元件	18
2.1.3 电感元件	19
2.1.4 小功率变压器	20
2.1.5 保险丝与断路器	20
2.1.6 常用机械开关	20
2.1.7 半导体元器件	21
2.2 半导体的基础知识	22
2.2.1 本征半导体	22
2.2.2 杂质半导体	22
2.2.3 PN 结	23
2.3 半导体二极管及其应用	25
2.3.1 二极管的结构和类型	25
2.3.2 二极管的特性与参数	25
2.3.3 二极管电路	27
2.3.4 半导体二极管的应用	28

2.3.5 特殊二极管	29
2.4 晶体三极管	32
2.4.1 晶体三极管的工作原理	33
2.4.2 晶体三极管的特性曲线	35
2.4.3 晶体三极管的主要参数	36
2.5 场效应管	38
2.5.1 结型场效应管	38
2.5.2 绝缘栅场效应管	40
2.5.3 场效应管的主要参数	43
2.6 半导体元器件的应用基本知识	44
2.6.1 半导体二极管的选择与判别	44
2.6.2 半导体三极管的选择与判别	45
2.6.3 场效应管与三极管的区别	46
本章小结	46
习题 2	48
第 3 章 放大电路基础	53
3.1 引言	53
3.2 共发射极放大电路	54
3.2.1 共发射极放大电路的结构和工作原理	54
3.2.2 放大电路的静态分析方法	57
3.2.3 放大电路的动态分析方法	59
3.2.4 放大电路的静态工作点稳定问题	63
3.3 共集电极放大电路	67
3.3.1 共集电极放大电路的结构	67
3.3.2 共集电极放大电路的分析	68
3.4 共基极放大电路	70
3.4.1 共基极放大电路的结构	70
3.4.2 共基极放大电路的动态分析	70
3.5 场效应管放大电路	72
3.5.1 场效应管放大电路的工作原理	73
3.5.2 场效应管放大电路的计算	74
3.6 多级放大电路	75
3.6.1 多级放大电路的耦合方式	75
3.6.2 直接耦合放大电路中的特殊问题	77
3.6.3 多级放大电路的性能指标分析	78
本章小结	79
习题 3	81

第 4 章 功率放大电路	85
4.1 引言	85
4.2 功率放大电路的一般问题	86
4.3 变压器耦合推挽功率放大电路	87
4.4 乙类互补对称功率放大电路	89
4.4.1 双电源乙类互补对称功率放大电路	89
4.4.2 单电源乙类互补对称功率放大电路	90
4.4.3 乙类互补对称功率放大电路的估算	91
4.4.4 BTL 电路	92
4.5 甲乙类互补对称功率放大电路	93
4.6 集成功率放大电路及其应用	95
4.6.1 TDA 2030A 音频功率放大器简介	95
4.6.2 TDA 2030A 音频功率放大器的典型应用	97
4.6.3 其他集成功率放大电路的应用	99
4.7 功率放大电路应用中的几个问题	101
本章小结	102
习题 4	102
第 5 章 集成运算放大器与运算电路	105
5.1 引言	105
5.2 模拟集成电路中的电流源	106
5.2.1 镜像电流源	106
5.2.2 比例电流源与微电流源	107
5.3 差分放大器	107
5.3.1 基本差分放大器及其分析	107
5.3.2 实际差分放大器	110
5.3.3 差分放大器的输入与输出方式	113
5.4 集成运算放大器	114
5.4.1 集成运算放大器的内部组成电路	114
5.4.2 集成运放的基本技术指标	116
5.4.3 集成运放的封装	118
5.4.4 集成运放的电路模型与外接电路	119
5.5 基本运算电路	120
5.5.1 比例运算电路	121
5.5.2 加法与减法运算电路	122
5.5.3 积分与微分运算电路	124
5.5.4 对数与反对数运算电路	126
5.6 模拟乘法器与应用	127

5.6.1	模拟乘法器的基本概念	127
5.6.2	模拟集成乘法器	128
5.6.3	模拟集成乘法器在运算电路中的应用	131
5.7	集成运算放大器应用中的几个问题	132
	本章小结	134
	习题5	135
第6章	负反馈放大电路	139
6.1	引言	139
6.2	反馈电路的基本概念	139
6.2.1	什么是反馈电路	139
6.2.2	负反馈电路的基本关系式	140
6.2.3	反馈的基本类型	141
6.3	负反馈的四种组态电路	145
6.3.1	电压串联负反馈电路	145
6.3.2	电压并联负反馈电路	147
6.3.3	电流串联负反馈电路	147
6.3.4	电流并联负反馈电路	149
6.4	深度负反馈放大电路的估算	150
6.5	负反馈对放大电路性能的影响	152
6.5.1	提高放大倍数的稳定性	152
6.5.2	展宽通频带	153
6.5.3	减小非线性失真	154
6.5.4	改变放大器的输入电阻和输出电阻	155
6.6	负反馈放大电路应用中的问题	158
6.6.1	为改善放大器性能而引入负反馈的一般原则	158
6.6.2	负反馈放大电路自激振荡产生的原因与消除方法	158
	本章小结	160
	习题6	161
第7章	信号处理电路	165
7.1	引言	165
7.2	测量放大电路	165
7.2.1	集成仪表放大器	166
7.2.2	电桥放大器	167
7.2.3	程控增益放大器	169
7.2.4	电荷放大器	170
7.3	有源滤波器	171
7.3.1	滤波器的基础知识	171

7.3.2 RC 有源滤波器	173
7.4 电压/电流转换电路	177
7.4.1 基本电压/电流转换电路	177
7.4.2 集成电压/电流变换器	178
本章小结	179
习题 7	180
第 8 章 信号产生电路	182
8.1 引言	182
8.2 正弦振荡电路的工作原理与振荡条件	183
8.2.1 振荡电路产生振荡的基本原理	183
8.2.2 振荡电路的平衡条件	184
8.2.3 振荡电路的起振条件	185
8.3 RC 正弦波振荡电路	185
8.3.1 RC 移相振荡电路	185
8.3.2 RC 桥式振荡电路	186
8.4 LC 正弦波振荡电路	187
8.4.1 变压器反馈式振荡电路	187
8.4.2 电感三点式振荡电路	188
8.4.3 电容三点式振荡电路	190
8.5 石英晶体振荡电路	192
8.5.1 石英晶体的工作原理	192
8.5.2 石英晶体振荡电路分析	193
8.6 非正弦波振荡电路	194
8.6.1 电压比较器	195
8.6.2 矩形波与三角波产生电路	197
8.6.3 锯齿波产生电路	199
8.7 集成电路函数发生器 8038 及其应用	200
本章小结	201
习题 8	202
第 9 章 直流稳压电源	209
9.1 直流稳压电源的组成与技术指标	209
9.1.1 直流稳压电源的组成	209
9.1.2 稳压电源的主要技术指标	210
9.2 单相整流电路	211
9.2.1 单相半波整流电路	211
9.2.2 单相桥式整流电路	212
9.3 滤波电路	214



9.3.1 电容滤波电路	214
9.3.2 电感滤波电路	216
9.3.3 复式滤波电路	216
9.4 稳压电路	217
9.4.1 稳压管稳压电路	217
9.4.2 串联型三极管稳压电路	219
9.5 集成电路稳压器	220
9.5.1 单片式三端集成稳压器	220
9.5.2 三端集成稳压器的应用	221
*9.6 开关式稳压电路简介	223
9.6.1 开关式稳压电路的工作原理	223
9.6.2 脉宽调制型开关式稳压电路	224
9.7 直流稳压电源的调整与测试	225
9.7.1 测试前的检查	225
9.7.2 直流稳压电源的测试步骤	226
本章小结	228
习题9	229
*第10章 晶闸管电路	233
10.1 引言	233
10.2 晶闸管	234
10.2.1 晶闸管的结构	234
10.2.2 晶闸管的工作原理与伏安特性	234
10.2.3 晶闸管的主要参数	237
10.2.4 特殊晶闸管	238
10.3 晶闸管触发电路	240
10.3.1 对触发电路的要求	240
10.3.2 单结晶体管及其触发电路	241
10.4 单相可控整流电路	244
10.4.1 电阻性负载	244
10.4.2 大电感负载	247
10.5 三相可控整流电路	248
10.5.1 工作原理	249
10.5.2 电路分析与计算	250
10.6 晶闸管的其他应用电路	252
10.6.1 晶闸管交流调压电路	252
10.6.2 直流伺服电动机调速电路	253
10.6.3 固体继电器电路	254
本章小结	255

习题 10	256
* 第 11 章 EWB 简介与模电仿真实验项目	258
11.1 引言	258
11.2 EWB 软件简介	259
11.2.1 EWB 的基本功用	259
11.2.2 EWB 的工作界面	260
11.3 EWB 的操作方法	263
11.3.1 创建电路	263
11.3.2 虚拟仪器仪表的使用	269
11.4 EWB 仿真实验项目	270
11.4.1 集成运算放大器的基本运算电路 (综合性实验)	270
11.4.2 RC 有源低通与带阻滤波器 (综合性实验)	274
11.4.3 方波 - 三角波发生器的设计与研究 (设计性实验)	276
11.4.4 运算放大器组成万用表的设计与调试 (设计性实验)	279
11.4.5 集成运算组成的负反馈放大电路 (综合性实验)	282
附录 A 常用电子技术物理量符号	286
附录 B 常用模拟集成电路芯片	290
部分习题答案	296
参考文献	302



第1章

绪论

本章讨论信号、电子系统放大电路等基本概念。信号的基本概念包括信号的定义、信号的分类、信号的频谱等内容。电子系统的基本概念包括系统的分类和电子系统的基本结构。放大电路的基本概念包括放大电路的组成、放大电路的主要性能指标等基本知识。

1.1 引言

电子技术是研究电子元器件及电路系统的设计、分析及制造的工程实用技术。目前电子技术主要由模拟电子技术和数字电子技术两部分组成。

通常我们把由电阻、电容、三极管、二极管、集成电路等电子元器件组成并具有一定功能的电路称为电子电路。

一个完整的电子电路系统通常由若干个功能电路组成，功能电路主要有放大器、滤波器、信号源、波形发生电路、数字逻辑电路、数字存储器、电源、模拟/数字转换器等。

电子技术的发展很大程度上反映在电子元器件和计算机技术的发展上。1904年第一只电子管问世；1947年由贝尔实验室制成第一只晶体管；1958年第一片集成电路制成，但只有4只晶体管，而1969年一片集成电路中有40亿只晶体管（大规模集成电路）；1975年实现了超大规模集成电路。有的科学家预言，集成度将以每6年10倍的速度增加，直到2015或2020年达到饱和。

在电子技术迅猛发展的今天，电子电路的应用在日常生活中无处不在，小到门铃、收音机、DVD播放机、电话机等，大到全球定位系统（Global Positioning Systems, GPS）、雷达、导航系统等。

模拟电子技术是一门研究对模拟（连续）信号进行处理的模拟电路的学科。它以半导体二极管、半导体三极管、场效应管和模拟集成电路（芯片）为基本半导体电子元器件，由这些基本半导体电子元器件组成电压（或电流）放大电路、功率放大电路、运算放大电路、反馈放大电路、信号运算与处理电路、信号产生电路、电源稳压电路等基本模拟电子电路。

模拟电子技术是研究模拟电路的，而模拟电路则是对模拟信号进行处理的电路。模拟信号是指在时间和幅值上都连续变化的信号，例如正弦电流、正弦电压、温度、湿度、速度等都属于模拟信号。而数字电路是对数字信号进行处理的电路，数字信号是指在时间和幅值上离散的信号，表现为方波信号，即只分为高电平和低电平，如电报信号、计算机数据信号等。

模拟电子技术是一门工程性、实践性很强的学科，包括元器件识别、测试和选择，电路

组装, 焊接工艺, 电路的调试, 电路性能的测量, 电路故障的判断与排除, EDA 软件的应用等。

综上所述, 可见, 模拟电子技术研究的内容有基本半导体电子元器件、基本模拟电子电路, 以及模拟电路的工程与实践。

模拟电子电路的前导课程为普通物理学和电路分析, 后续课程为数字电子技术、高频电子线路、单片机原理与应用等。

1.2 信号的基本概念

1.2.1 信号的定义

按照《现代汉语词典》的定义, 信号是“用来传递信息或命令的光、电波、声音、动作等”。这是对各种各样信号的一般性定义, 而电信号的定义是: 电信号是“电路中用来控制其他部分的电流、电压或无线电发射机发射出的电波”。

物质的一切运动或形态的变化, 广义地说都是一种信号 (signal), 即信号是物质运动的表现形式。例如, 在我国古代烽火台上的烽火与狼烟这个信号, 是用来传递敌军入侵这个消息的。也就是说, 信号是消息的表现形式, 消息则是信号的具体内容。

信号有千万种, 例如, 机械运动产生力信号、位移信号及噪声信号; 雷电过程产生声、光信号; 大脑、心脏运动分别产生脑电和心电信号; 电气系统随参数变化产生电磁信号等。

在通信过程中, 通过各种消息的传递, 使受信者获取各种不同的信息 (information)。信息作为一个科学术语被提出和使用, 可追溯到 1928 年 R. V. Hartly 在《信息传输》一文中的描述。他认为: 信息是指有新内容、新知识的消息。而关于“信息”一词, 有多种定义。1948 年, C. E. Shannon 博士在《通信的数学理论》中给出信息的数学定义, 认为信息是用以消除随机不确定性的东西 (信息是肯定性的确认, 确定性的增加)。1956 年, 英国学者 Ashby 提出“信息是集合的变异度”。1975 年, 意大利学者 G. Longo 在《信息论: 心得趋势与未决问题》指出: 信息是反映事物构成、关系和差别的东西, 它包含在事物的差异之中, 而不在事物的本身; 等等。可见, 至今为止, 信息的概念仍然仁者见仁、智者见智。

所以, 一般地说, 信息是指具有新内容、新知识的消息, 是排除消息中那些不确定性的东西, 它既不是物质, 也不是能量, 但它也必须依附于物质, 依附于能量。

通常, 传送消息的信号形式是随时间变化的。如温度信号、压力信号、光信号、电信号等, 它们反映的事物在不同时刻的变化状态, 把这类信号统称为时间信号。

由于电信号处理起来比较方便, 所以工程上常把非电信号通过传感器转变为电信号进行传输。基于电信号的重要性, 本书仅研究电信号, 并把它简称为信号。

由于飞机的航向、速度、高度等随时间发生变化, 雷达所接收到的有关飞机的信号也就随时间而变化。作为物理过程的信号, 我们可以借助示波器或其他测试仪表来进行观察与记录。但这种实验的方法有其固有的局限性, 即所得到的结果往往只是局部的、个别的, 缺乏普适性。因此, 为了对信号进行分析与研究, 必须使用语言来对信号进行描述, 或者说, 建立信号的数学模型。

数学上, 信号可表示为一个或多个自变量的函数。一般模拟信号表示为时间 t 的函数 $f(t)$, 离散信号表示为序号 k 的函数 $f(k)$ 。函数的图形则称为信号的波形。在叙述上, 常常将“信号”与“函数”不加区分地互相混用。

在电系统中, 信号的两种主要形式是电压信号和电流信号, 可分别用时间函数 $u(t)$ 和 $i(t)$ 表示。若 $u(t)$ 和 $i(t)$ 表示输入信号, 一般记为 $f(t)$; 若 $u(t)$ 和 $i(t)$ 表示输出信号, 一般记为 $y(t)$ 。

1.2.2 信号的分类

按照信号的不同性质与数学特征, 可以有多种不同的分类方法。例如, 按照信号的物理特性, 可以分为光信号、电信号等; 按照信号的用途, 可以分为雷达信号、电视信号、通信信号等; 按照信号的数学对称性, 可以分为奇信号、偶信号、非对称信号等; 从能量的角度出发, 可以分为功率信号与能量信号; 从信号的特征出发, 可以分为模拟信号与离散信号、确定信号与随机信号、周期信号与非周期信号, 等等。基于信号特征的分类方法是我们在信号分析中最常用到的。

1. 确定信号与随机信号

对于任意的确定时刻都有确定的函数值相对应, 这样的函数称为确定函数。凡是可以用确定函数加以描述的信号, 称为确定信号。

例如, 对于一个正弦信号来说, 只要给出一个确定的时间点 t_0 , 就可以得到一个确定的函数值 $\sin\omega t_0$ 。可见, 正弦信号是一个确定信号。

但是, 实际传输的信号往往具有未可预知的不确定性。这种信号称为不确定信号, 或随机信号。如果通信系统中传输的信号都是确定信号, 接收者就不可能由它得到任何新的信号, 从而失去了可通信的意义。所以对接收者而言, 它所接收到的有用信号都是不确定信号。

信息是信息论中的一个专用词。它是消息(如命令、光、电波、声音、动作等)的一种量度, 即消息中有意义的内容。在本书中消息、信息未加区分。

此外, 在信号的传输过程中, 不可避免地要受到各种干扰和噪声的影响, 这些干扰和噪声都具有随机特性。可见, 严格意义上的确定信号实际上是不存在的, 因此, 随机信号的研究具有极为重要的实际意义。

对于随机信号, 不能用确定的实际函数来加以描述, 只可能知道它在某一时刻取某一函数值的概率。

本书只讨论确定信号, 但应该指出的是, 随机信号及其通过系统的研究是以本书所讨论的确定信号通过系统的理论为基础的。

图 1.1 给出了几种信号波形, 其中图 1.1 (a) ~ 图 1.1 (e) 所示信号为确定信号, 图 1.1 (f) 为随机信号。

2. 模拟信号与数字信号

一个信号, 若在某个时间区间内, 除有限个间断点外的所有瞬时都有确定的值, 就称这个信号为在该区间内的连续时间信号, 又称模拟信号。

我们所熟悉的正弦信号, 其表达式为

$$f(t) = \sin\omega t$$

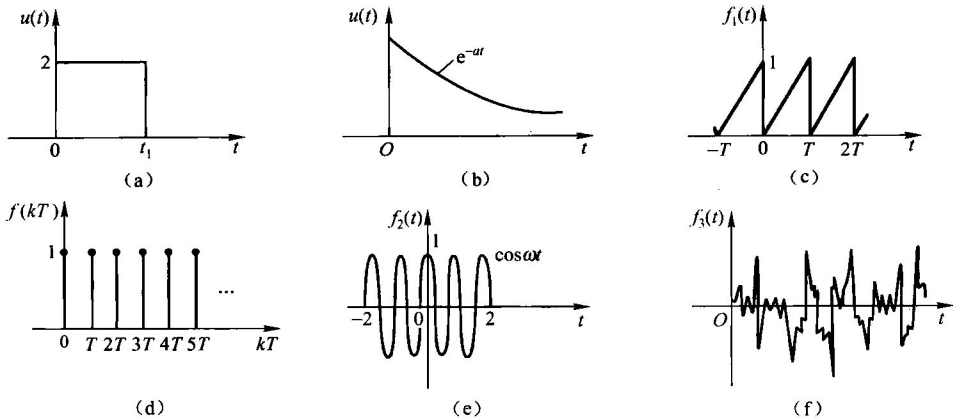


图 1.1 几种信号的波形

显然，在时间区间 $-\infty < t < \infty$ 内，它没有任何间断点，且在任意的确定时刻 t_0 ，都有确定的函数值 $\sin\omega t_0$ 。可见，正弦信号满足上述定义，因而是一个模拟信号。

一个信号，如果只是在离散的时间瞬间才有确定的值，就称为离散时间信号，简称离散信号。

将上述正弦信号通过一个开关，这个开关每隔时间 T 就合上，瞬间后又断开，就得到一个离散信号

$$f(k) = f(kT) = \sin\omega kT, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

如图 1.2 所示。

随着电子计算机的飞速发展与普及使用，以及对模拟时间信号进行抽样的各种技术与元器件的发展，离散信号与系统的分析具有越来越重要的地位。

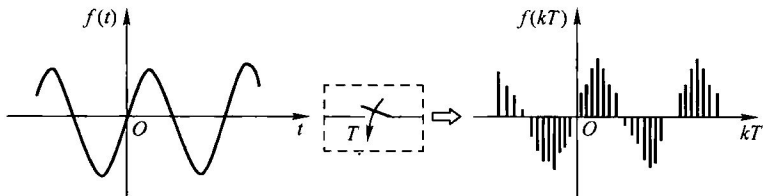


图 1.2 模拟信号与离散信号

应该指出，尽管模拟信号的自变量是连续变化的，而离散信号的自变量是离散取值的，但它们的函数值都是连续变化的。我们称自变量（例如时间 t ）与函数值都连续变化的信号为模拟信号。

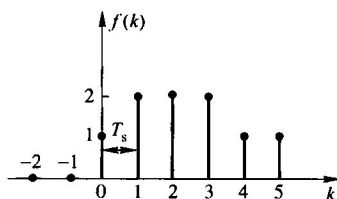


图 1.3 数字信号

一个信号，如果不仅自变量（例如时间 t ）的取值是离散的，其函数值也是“量化”（离散）的，则这种信号就称为数字信号。例如，某个数字信号如图 1.3 所示。

所谓“量化”，就是把经过抽样得到的瞬时值将其幅度离散，即用一组规定的电平，把瞬时抽样值用最接近的电平值来表示。也就是说，在信号处理中，将连续的信号取值离散化为有限多个取值的过程。

数字信号与一般的离散信号在数学模型与分析方法上并无原则区别，实际上，我们在讨论中对它们不再区分，统称为数字信号。

3. 周期信号与非周期信号

无始无终地重复着某一变化规律的信号，称为周期信号。

用数学语言来描述，周期信号 $f(t)$ 必定满足

$$f(t) = f(t+kT), \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1)$$

使上式得以成立的最小的 T 值，称为 $f(t)$ 的周期。也就是说，经过一个周期 T ， $f(t)$ 的取值就重复一次。

图 1.4 是两个周期信号的例子，它们都满足式 (1.1)。其中

$$f_1(t) = \sin \omega t$$

容易看出，它的周期是 $T=2\pi/\omega$ 。不满足式 (1.1) 的信号是非周期信号。

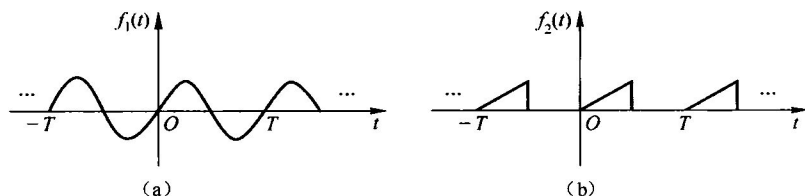


图 1.4 周期信号

图 1.5 是三个非周期信号的例子，它们都不满足式 (1.1)。其中， $f_1(t)$ 是有始无终的， $f_2(t)$ 无论经过多长的时间都不再会重复区间内信号的规律，而 $f_3(t)$ 则完全无规律可言。

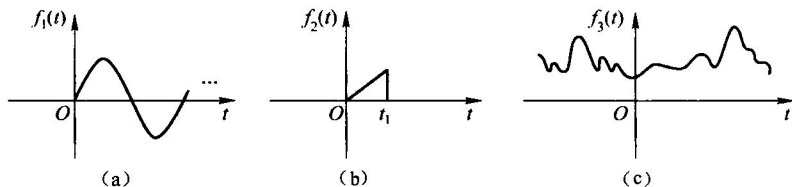


图 1.5 非周期信号

1.2.3 信号的频谱

当周期信号分解为傅里叶级数后，得到直流分量和无穷多个谐波分量之和，从而可在频域内方便地予以比较。为了直观地反映周期信号中各频率分量的分布情况，可将其各频率分量的幅值和初相位随频率变化的关系用图形表示出来，这就是信号的频谱图（也称频谱、频率特性或频率响应）。频谱包括幅值频谱和相位频谱两种，前者表示谐波分量的振幅 A_n 随频率变化的关系；后者表示谐波分量的初相位 φ_n 随频率变化的关系。

除周期信号外，在自然界和各种工程技术领域中还广泛地存在着非周期信号。例如，放射性信号随时间的衰变呈指数规律；汽车点火装置产生的电火花是一种脉冲信号；振荡器的频率漂移几乎随时间呈线性增长等。人们天天打交道的语音信号也是非周期的。傅里叶本人在提出他的著名论断“周期信号可表示为成谐波关系的三角函数之加权”以后，曾致力

于非周期信号的分解。研究非周期信号频谱的数学工具是傅里叶变换。

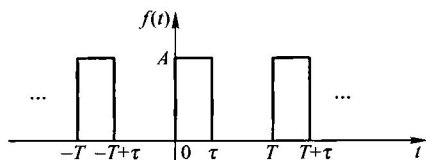


图 1.6 例 1.1 的图

1. 周期信号的频谱

通过一个例子来分析周期信号的频谱。

例 1.1 把图 1.6 所示周期性矩形波展开成正弦形式的傅里叶级数，并讨论它的频谱特性。

解 傅里叶级数计算如下：

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^\tau A dt = \frac{A\tau}{T}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^\tau f(t) \cos n\omega_0 t dt = \frac{2}{T} \int_0^\tau A \cos n\omega_0 t dt$$

$$= \frac{A\tau}{T} \times \frac{2}{n\omega_0 \tau} \sin n\omega_0 \tau$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^\tau f(t) \sin n\omega_0 t dt = \frac{2}{T} \int_0^\tau A \sin n\omega_0 t dt$$

$$= \frac{A\tau}{T} \times \frac{1 - \cos n\omega_0 \tau}{n\omega_0 \tau}$$

所以有

$$A_0 = a_0 = \frac{A\tau}{T}$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{2A\tau}{T} \times \frac{\sin n\omega_0 \tau / 2}{n\omega_0 \tau / 2}$$

$$\varphi_n = -\arctan \frac{b_n}{a_n} = -\frac{n\omega_0 \tau}{2}$$

$$f(t) = \frac{A\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\omega_0 \tau}{2}}{\frac{n\omega_0 \tau}{2}} \times \cos n\omega_0 \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right]$$

由上述结果画出的周期性矩形波的幅值频谱和相位频谱如图 1.7 所示。

频谱图上相应各谐波分量的竖线称为谱线，其位置 $n\omega_0$ 即为该次谐波的角频率，每根谱线的高度即为该次谐波的振幅（或相位）值。从图 1.7 可以看出周期信号的频谱具有下列几个特点。

(1) 离散性

如图 1.7 所示，周期信号的频谱由基频 ω_0 为间隔的若干离散谱线组成，其分布情况取决于信号的波形，这样的频谱称为离散频谱。图中的虚线是通过各条谱线端点的连线，称为频谱包络线。

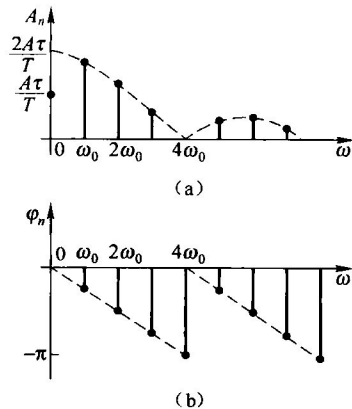


图 1.7 周期性矩形波的幅值频谱和相位频谱