



普通高等教育

电气类

国家级特色专业系列规划教材

模拟电子技术基础

(第二版)

唐治德 申利平 主编



科学出版社

普通高等教育电气类国家级特色专业系列规划教材

模拟电子技术基础

(第二版)

唐治德 申利平 主编

科学出版社

（北京）

（中国北京）

内 容 简 介

本书系统地介绍了模拟电路的分析方法、设计方法和典型应用。全书内容包括电子系统概述、运算放大器的开环特性和等效模型、负反馈放大电路、基本运算电路、有源滤波电路、半导体二极管及其应用电路、晶体管及其交流放大电路、集成放大电路、乘除法电路和对数指数电路、场效应管及其放大电路、电压比较器和信号产生电路、直流稳压电源。

本书内容充实、论述透彻、便于自学,可作为高等学校电气信息、电子信息类各专业的“模拟电子技术基础”课程的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/唐治德,申利平主编.—2版.—北京:科学出版社,2015.1

(普通高等教育电气类国家级特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-043250-6

I. ①模… II. ①唐… ②申… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材
IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 023026 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:桂伟利
责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 1 月第 二 版 印张:25 1/4

2015 年 1 月第八次印刷 字数:646 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

《模拟电子技术基础》自 2009 年出版以来,历经五载,受到学生和教师的关注,提出了许多宝贵的意见,在此表示感谢。

根据教育部高等学校电子电气课程教学指导分委员会撰写的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求,并参考学生的宝贵意见和教师的教学经验,对教材进行了改编。

全书内容依序为电子系统概述、运算放大器的开环特性和等效模型、负反馈放大电路、基本运算电路、有源滤波电路、半导体二极管及其应用电路、晶体管及其交流放大电路、集成放大电路、乘除法电路和对数指数电路、场效应管及其放大电路、电压比较器和信号产生电路、直流稳压电源。

本书具有以下主要特色。

(1) 与普遍采用的“器件-电路-系统应用”教材体系不同,本书采用“自顶向下”的教材体系,别具一格。首先,以运放的开环特性建立运放等效模型,通过运放组成的电路介绍反馈理论、运算电路和滤波电路;其次,介绍半导体器件和集成电路组件,包括二极管、晶体管、场效应管、运算放大器组件、功率放大器组件、信号发生器组件和电源组件。“自顶向下”的体系可以使学生高屋建瓴,系统意识强,最快地学习工程实际电子电路,增强学习兴趣(16 学时内可学完运放组成的反馈电路、信号运算电路和有源滤波电路)。

(2) 夯实电子技术基础理论,论述清晰、简明扼要。配合“自顶向下”的教材体系,以运放电路引入反馈理论,指导电子电路的分析和设计。以二极管电路介绍基本电子电路的分析方法——图解法、分段线性法和小信号模型法,通过简单电路掌握电子电路的小信号分析方法和直流分析方法;应用这些分析方法指导基本放大电路的构成和分析,即基本放大电路按直流偏置、小信号放大和大信号放大编排教学内容,凸显了理论对电路的指导作用和教学内容的连贯性。

(3) 在选材方面注重基础性和先进性相结合、理论知识与工程应用相结合,适应 21 世纪对电气信息类专业人才的要求。教学内容以集成电路及其应用为主线,由浅入深,循序渐进,符合认知规律。运用类比和归纳思维方法,科学地处理好教学内容的深度和广度的关系、教学内容的特殊性和工程问题的一般性关系。在引导学习方面,注重目的性、趣味性和实用性,概念清楚,论述严密。

(4) 知识模块化,适应不同专业的需求。本书可分为信号处理模块(第 1~5 章)、器件和集成组件模块(第 6~10 章)、信号产生和电源模块(第 11、12 章)。

本书的修订工作主要由唐治德和申利平完成,重庆大学电气工程学院电子技术课程教师熊兰、吕宗伟、王明昌和徐盛友提出了许多宝贵的意见,感谢他们为本书所做的贡献。

编者从事电子技术教学数十载,深感电子技术飞速发展,敬畏科学技术的巨大变化。虽然殚精竭虑,但百密一疏,书中仍可能存在不足之处,恳请同行专家和广大读者批评指正。

唐治德

2014 年 5 月于重庆嘉陵江畔

目 录

前言

第1章 电子系统概述	1
1.1 电力系统与电子系统	1
1.2 信号及其频谱	2
1.2.1 信号	2
1.2.2 信号的频谱	3
1.3 电子系统组成框图	6
1.4 电子技术及其发展概述	7
习题	10
第2章 运算放大器的开环特性和等效模型	12
2.1 放大电路基础	12
2.1.1 放大电路的概念	12
2.1.2 放大电路的等效模型	13
2.1.3 放大电路的主要性能指标	16
2.2 运算放大器的特性和等效模型	19
2.2.1 集成运算放大器的基本概念	19
2.2.2 运算放大器的开环传输特性	20
2.2.3 运算放大器的线性模型	21
2.2.4 运算放大器的非线性模型	24
2.3 Multisim 仿真——集成运算放大器的开环传输特性	24
习题	26
第3章 负反馈放大电路	29
3.1 反馈的基本概念	29
3.1.1 反馈和反馈放大电路的方框图	29
3.1.2 反馈的分类和判断	30
3.2 负反馈放大电路的4种基本组态	36
3.2.1 电压串联负反馈	36
3.2.2 电压并联负反馈	37
3.2.3 电流串联负反馈	38
3.2.4 电流并联负反馈	39
3.3 负反馈放大电路的闭环增益表达式	40
3.4 深度负反馈放大电路的计算	41
3.4.1 深度负反馈的特点	41
3.4.2 电压放大器	43
* 3.4.3 电流-电压转换器	44

* 3.4.4 电压-电流转换器	45
* 3.4.5 电流放大器	46
3.5 负反馈对放大电路性能的改善	47
3.5.1 提高增益的稳定性	47
3.5.2 改善输入电阻和输出电阻	47
3.5.3 减小非线性失真	49
3.5.4 抑制干扰和噪声	50
3.5.5 扩展通频带宽	51
* 3.6 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	52
* 3.6.1 自激振荡的条件	53
* 3.6.2 负反馈放大电路的稳定性分析	53
* 3.6.3 频率补偿	57
* 3.7 Multisim 仿真——电压串联负反馈及其频率特性	58
习题	60
第4章 基本运算电路	65
4.1 比例运算电路	65
4.1.1 反相比例运算电路	65
4.1.2 同相比例运算电路	67
4.2 加法电路	68
4.2.1 反相加法电路	69
4.2.2 同相加法电路	69
4.3 减法电路	70
4.3.1 单运放减法电路	70
4.3.2 仪用放大电路	71
4.4 积分和微分电路	72
4.4.1 积分电路	72
4.4.2 微分电路	74
4.5 通用函数运算电路原理	75
4.6 Multisim 仿真——求和电路和积分电路	76
习题	77
第5章 有源滤波电路	86
5.1 滤波器的功能及分类	86
5.2 滤波器的稳态频率响应和传递函数	88
5.2.1 滤波器的稳态频率响应	88
5.2.2 滤波器的传递函数	90
5.3 一阶有源滤波器	92
5.4 二阶有源滤波器	93
5.4.1 二阶有源低通滤波器	94
5.4.2 二阶有源高通滤波器	95
5.4.3 二阶有源带通滤波器	97

5.4.4	二阶有源带阻滤波器	99
5.5	滤波器设计	101
5.5.1	频率变换	101
5.5.2	滤波器设计流程	103
5.5.3	巴特沃思滤波器	103
5.5.4	巴特沃思低通滤波器设计示例	106
5.6	Multisim 仿真——二阶低通滤波器的频率特性	108
	习题	109
第6章	半导体二极管及其应用电路	113
6.1	半导体材料	113
6.1.1	本征半导体	113
6.1.2	N型半导体	115
6.1.3	P型半导体	115
6.2	PN结的形成及特性	116
6.2.1	PN结的形成	116
6.2.2	PN结的单向导电性	117
6.2.3	PN结的反向击穿	118
6.2.4	PN结的电容效应	119
6.3	半导体二极管	120
6.3.1	二极管的结构	120
6.3.2	二极管的伏安特性	121
6.3.3	二极管的主要参数	122
6.4	二极管电路分析方法——非线性电路分析方法	123
6.4.1	图解法	123
6.4.2	小信号模型法	125
6.4.3	分段线性模型法	127
6.5	特殊二极管	129
6.5.1	稳压二极管	129
6.5.2	变容二极管	131
6.5.3	光电二极管	131
6.5.4	发光二极管	132
6.6	二极管应用电路	133
6.6.1	最大值检测电路	133
6.6.2	精密整流电路	135
6.7	Multisim 仿真——二极管的伏安特性	136
	习题	138
第7章	晶体管及其交流放大电路	143
7.1	晶体管	143
7.1.1	晶体管的结构	143
7.1.2	晶体管的电流控制作用	145

90	7.1.3	晶体管的伏安特性	147
101	7.1.4	晶体管的主要参数	149
101	7.1.5	温度对晶体管的特性和参数的影响	151
601	7.2	放大电路的直流偏置	151
601	7.2.1	基本偏置电路和静态工作点分析方法	152
801	7.2.2	电流串联负反馈偏置电路	153
801	7.2.3	电压并联负反馈偏置电路	154
601	7.3	共射极放大电路	155
811	7.3.1	信号的耦合方式	155
811	7.3.2	晶体管的低频小信号模型	156
811	7.3.3	放大电路的小信号分析	159
811	7.3.4	放大电路的大信号分析	164
811	7.4	共集电极和共基极放大电路	166
911	7.4.1	共集电极放大电路	166
911	7.4.2	共基极放大电路	168
711	7.4.3	晶体管三种放大电路的比较	171
811	7.5	放大电路的频率响应	171
911	7.5.1	晶体管的高频小信号模型及其参数	172
931	7.5.2	晶体管的频率参数	174
931	7.5.3	共射极放大电路的频率响应	175
131	7.5.4	共集电极放大电路的频率响应	182
931	7.5.5	共基极放大电路的频率响应	184
831	7.6	Multisim 仿真——放大电路的静态分析和动态分析	187
831		习题	189
	第 8 章	集成放大电路	200
731	8.1	集成放大电路概述	200
931	8.1.1	集成电路的概念及其优势	200
931	8.1.2	单片集成电路中的元件及特点	200
161	8.1.3	直接耦合放大电路及其零点漂移	201
161	8.1.4	集成放大电路的组成框图	202
861	8.2	电流源电路	203
161	8.2.1	镜像电流源	203
881	8.2.2	微电流源	204
361	8.2.3	威尔逊电流源	205
361	8.2.4	多路电流源	205
861	8.3	差分放大电路	206
841	8.3.1	共射差分放大电路的组成和工作原理	206
841	8.3.2	共射差分放大电路的输入输出方式和交流性能	212
641	8.3.3	共射差分放大电路的电压传输特性	216
641	8.4	功率放大电路	218

8.4.1	功率放大电路概述	218
8.4.2	乙类 OCL 功率放大电路	220
8.4.3	乙类 OTL 电路和乙类 BTL 电路	223
8.4.4	甲乙类互补对称功率放大电路	224
8.4.5	集成功率放大器	227
8.4.6	功率器件的散热	230
8.5	集成运算放大器	231
8.5.1	双极型集成运算放大器 LM741	232
8.5.2	集成运算放大器的主要参数	235
8.5.3	集成运算放大器的种类和选择	236
8.6	运放的误差模型	237
8.6.1	运放内部电路对输出失调电压的影响	238
8.6.2	运放外部电路对输出失调电压的影响	238
8.6.3	运放的误差模型和输出失调电压	238
8.6.4	运放的输出失调电压漂移	239
8.7	深度负反馈放大电路的计算误差	239
8.8	直流负反馈对输出失调电压和温度漂移的抑制	241
8.9	Multisim 仿真——差分放大电路分析	241
	习题	243
第 9 章	乘除法电路和对数指数电路	251
9.1	模拟乘法器概念	251
9.2	变跨导模拟乘法器	251
9.2.1	变跨导模拟乘法器原理	251
9.2.2	四象限变跨导乘法器	252
9.2.3	变跨导模拟乘/除法器	254
9.3	单片集成乘/除法器 AD734 及其应用	256
9.3.1	AD734 原理框图和转移函数	256
9.3.2	AD734 基本乘法电路	257
9.3.3	AD734 基本除法电路	257
9.3.4	AD734 开方电路	258
9.3.5	AD734 三变量乘/除法电路	258
9.4	对数和指数运算电路	258
9.4.1	对数运算电路	259
9.4.2	指数运算电路	260
9.4.3	对数式乘/除法电路	261
9.5	Multisim 仿真——对数运算电路的仿真分析	262
	习题	263
第 10 章	场效应管及其放大电路	266
10.1	绝缘栅型场效应管	266
10.1.1	N 沟道增强型 MOSFET	266

818	10.1.2 N 沟道耗尽型 MOSFET	271
898	10.1.3 P 沟道 MOSFET	272
838	10.1.4 MOSFET 的主要参数	274
108	10.2 结型场效应管	275
728	10.2.1 JFET 的结构和工作原理	275
088	10.2.2 JFET 的特性曲线	277
128	10.3 场效应管放大电路	278
888	10.3.1 场效应管放大电路的三种组态	278
888	10.3.2 直流偏置电路和静态分析	278
808	10.3.3 小信号模型和动态分析	281
768	10.4 场效应管电流源	286
868	10.4.1 NMOS 管镜像电流源	286
848	10.4.2 NMOS 管多路电流源	287
868	10.5 共源差分放大电路	287
848	10.6 CMOS 集成运算放大器 MC14573	289
888	10.7 Multisim 仿真——共源放大电路的仿真分析	290
118	习题	291
	第 11 章 电压比较器和信号产生电路	300
818	11.1 电压比较器	300
128	11.1.1 单限电压比较器	300
148	11.1.2 迟滞电压比较器	302
138	11.1.3 窗口比较器	305
128	11.1.4 集成电压比较器	306
888	11.2 非正弦波振荡器	307
148	11.2.1 矩形波振荡器	308
838	11.2.2 三角波振荡器	309
828	11.2.3 锯齿波振荡器	310
928	11.3 正弦波振荡器	311
788	11.3.1 正弦波振荡原理	312
838	11.3.2 RC 正弦波振荡器	313
848	11.3.3 LC 谐振回路的特性和选频放大器	316
878	11.3.4 LC 正弦波振荡器	319
878	11.3.5 石英晶体振荡器	322
088	11.4 单片集成函数发生器 ICL8038	324
108	11.4.1 压控电流源和电流源控制开关	325
388	11.4.2 迟滞比较器	325
808	11.4.3 压控振荡器	326
888	11.4.4 三角波-正弦波变换	327
808	11.4.5 ICL8038 的应用电路	330
888	11.5 Multisim 仿真	330

11.5.1 迟滞比较器的特性	330
11.5.2 电感反馈式正弦波振荡器	332
习题	333
第 12 章 直流稳压电源	343
12.1 直流稳压电源概述	343
12.1.1 直流稳压电源的作用和组成框图	343
12.1.2 直流稳压电源的主要技术指标	343
12.2 单相整流电路	345
12.2.1 单相半波整流电路	345
12.2.2 单相桥式整流电路	347
12.2.3 倍压整流	349
12.3 电源滤波电路	350
12.3.1 电容滤波电路	351
12.3.2 电感滤波电路	355
12.3.3 复式滤波电路	356
12.4 线性稳压电路	356
12.4.1 线性并联稳压电路	357
12.4.2 线性串联稳压电路	360
12.5 基准电压源	362
12.5.1 温度补偿稳压二极管基准电压源	362
12.5.2 能隙基准电压源	363
12.6 集成线性稳压器	364
12.6.1 三端固定稳压器	365
12.6.2 三端可调稳压器	367
* 12.7 开关稳压电路	369
* 12.7.1 开关串联稳压电路	369
* 12.7.2 开关并联稳压电路	371
* 12.8 开关集成稳压器	373
* 12.8.1 LM2576 开关集成稳压器	373
* 12.8.2 LM2576 应用电路	374
* 12.9 Multisim 仿真——三端固定稳压器 W7805 的特性	375
习题	376
参考文献	383
附录 A 电子设计自动化简介	384
附录 B Multisim 简介	387

第 1 章 电子系统概述

学习本章后,读者将了解:

- 实际的两大电路系统(电力系统和电子系统)的主要功能;
- 信号的概念,典型信号的频谱;
- 电子系统的组成框图;
- 电子技术及其发展简史。

1.1 电力系统与电子系统

实际电路系统主要有电力系统和电子系统。

电力系统的主要作用是实现电能的生产、变换、传输、分配和使用。电力系统是由发电厂、输电网、配电网和电力用户组成的整体,是将一次能源转换成电能并输送和分配到用户的一个统一系统。发电厂通过发电机等设备将一次能源转换成电能。例如,火力发电厂将化学能(燃烧煤、石油、天然气等)转换为电能,水力发电厂将水的势能转换为电能,核电厂将原子能转换为电能。输电网和配电网是由电力变压器、电力线路、电力开关设备和电力电容器等组成的、跨越广大地理区域的一个巨大电路。在我国,通常到达用户的单相正弦配电电压是 220V、频率 50Hz,三相正弦配电电压是 380V、频率 50Hz。发电厂生产的电能经过输电网和配电网输送和分配到用户的用电设备(电动机、家用电器和照明等),从而完成电能从生产到使用的整个过程。电力系统为工业、农业和社会生活的电气化建立起坚实的物质基础,产生了服务于电力系统的电气工程学科。

根据电力系统的功能,电力系统的设备工作在高电压和强电流的状态(俗称为强电)。例如,截至 2012 年 7 月 4 日,三峡水电站共安装 32 台 70 万千瓦水轮发电机组,还有两台 5 万千瓦的电源机组,总装机容量 2250 万千瓦,年发电量约 1000 亿千瓦时。70 万千瓦水轮发电机组的额定输出电压是 20kV,额定输出电流达 22.5kA,功率因素是 0.9,电压频率是 50Hz。由于金属材料的能量损耗很小,为了提高电能生产、传输和使用的效率,电力系统中的电气设备主要使用金属、磁性材料和绝缘材料,传导电流的机理主要是电子在金属材料中的运动。

电子系统则是由电子电路和传输介质组成的、完成特定功能的整体。与电力系统处理能量不同,电子系统的主要作用是实现电信号的产生、获取、放大、变换、传输、识别和应用等功能(或前述的部分功能),处理的对象是信号。所谓信号,是随时间变化的某种物理量,是信息的表现形式与传送载体。例如,体温反映人的健康信息,体温 37℃ 表示健康,38℃ 表示略有小疾。一般情况下,用电子系统处理电信号(电压或电流)比用其他方式(如机械方式)处理更容易、成本更低、可靠性更高,故通常将各种非电信号转换为电信号后再进行处理。因此,现代电子系统(通信系统、电视系统、计算机系统和工业控制系统等)成为信息化社会的物质基础。

由于真实世界的信号是多种多样的,存在于世界的各个角落,所以有许多不同的电子系统。例如,电力系统中有电能的质量信息、安全信息和调度信息等,故电力系统还包括保证其安全可靠运行的继电保护装置、安全自动装置、调度自动化和电力通信等相应的辅助系统,它

们统称为二次系统。目前,二次系统通常由电子系统实现。

一个简单的有线扩音系统框图如图 1.1.1 所示。人的语音信息通过声音传输,拾音器将声音引起的空气振动转换为电压信号;音频放大器将输入电压信号的幅度和功率放大,并驱动扬声器;扬声器将放大的电压信号还原成声强大的声音,听众提取语音信息并做出相应的反应。



图 1.1.1 有线扩音系统

将非电信号转换为电信号(电压或电流)的部件称为传感器(或换能器),如图 1.1.1 所示的有线扩音系统的拾音器。电子系统的核心是由电子元器件组成的实现信号处理的电路,称为电子电路,如图 1.1.1 所示的有线扩音系统的音频放大器。信号处理泛指对输入信号进行放大、运算、滤波、变换和传输等操作。经过电子系统处理后的电信号需要被还原为原来的非电信号,去影响物理世界。实现这种功能的部件称为执行器,如图 1.1.1 所示的有线扩音系统的扬声器。执行器消耗电能,通常用电阻模拟(R_L),作为电子系统的负载。

1.2 信号及其频谱

1.2.1 信号

如前所述,信号是随时间变化的某种物理量,是信息的表现形式与传送载体。一般情况下,用电子系统处理电信号(电压或电流)比其他方式(如机械方式)容易、成本低和可靠性高,故通常将各种非电信号转换为电信号再进行处理。

传感器作为电子系统的一种信号源,可等效为电压源或电流源,如图 1.2.1 所示。图中的电阻 R 表示转换过程中传感器的能量损耗,电压 $v(t)$ 或电流 $i(t)$ 通常与被转换的非电信号成正比(或其他函数关系)。由于非电信号随时间变化,故电压或电流都是时间的函数。

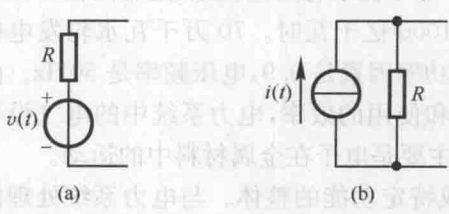


图 1.2.1 传感器等效为电压源或电流源

如果电压(或电流)在某个值域内可连续取值,则称其为连续信号或模拟信号。例如,电压是时间的正弦函数 $v(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi)$,电压在值域 $[-V_m, +V_m]$ 内可取任何值, $v(t)$ 是模拟信号。如果电压(或电流)在某个值域内只能是某个单位量的整数倍,则称其为离散信号或数字信号。例如,单位量为 1mV ,数字电压信号的幅值只能是 $0\text{mV}, \pm 1\text{mV}, \pm 2\text{mV}, \dots, \pm n\text{mV}$ 。图 1.2.2 是信号的波形图,图 1.2.2(a) 是模拟信号,图 1.2.2(b) 是多值数字信号,图 1.2.2(c) 是二值数字信号。

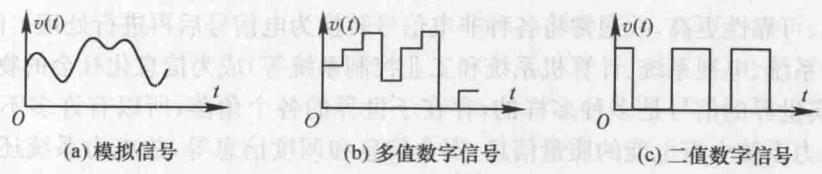


图 1.2.2 信息的波形图

处理模拟信号电子电路称为模拟电路(Analog Circuit),是模拟电子技术基础教材要讨论的主要内容。处理数字信号电子电路称为数字电路(Digital Circuit)。实现模拟信号转换为数字信号电子电路称为模数转换电路(Analog to Digital Converter, ADC),实现数字信号转换为模拟信号电子电路称为数模转换电路(Digital to Analog Converter, DAC)。通常,数字电路、模数转换电路和数模转换电路是数字电子技术基础教材要讨论的主要内容。

1.2.2 信号的频谱

信号承载的重要信息是它的频谱信息。例如,正弦信号 $v(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi)$,其全部信息是幅度 V_m 、相位 φ 和角频率 ω 。正因为正弦信号是如此简单,它常作为模拟电路的标准信号和测试信号。

信号幅度与频率的关系称为幅度频谱,信号相位与频率的关系称为相位频谱,它们统称为信号的频谱。

1. 周期信号的频谱

如果信号是时间的周期函数则称为周期信号。例如,电压周期信号

$$v(t) = v(t + T) \quad (1.2.1)$$

以周期 T 重复变化,每秒重复变化的次数称为频率,即

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.2.2)$$

如果周期信号 $v(t)$ 满足狄利克雷条件(Dirichlet's Condition):

- (1) $v(t)$ 在任意周期内绝对可积,即在任意时刻 t_0 , 积分 $\int_{t_0}^{t_0+T} |v(t)| dt$ 都存在;
- (2) $v(t)$ 在任意周期内只有有限个极值;
- (3) $v(t)$ 在任意周期内只有有限个不连续点,则 $v(t)$ 可展开为傅里叶级数,即

$$\begin{cases} v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)] = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \\ \omega_1 = 2\pi \frac{1}{T} \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \cos(n\omega_1 t) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \sin(n\omega_1 t) dt \\ V_0 = a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) dt \\ V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n} \end{cases} \quad (1.2.3)$$

式中,平均值 V_0 称为周期信号 $v(t)$ 的直流分量,其余正弦量部分统称为 $v(t)$ 的交流分量。交流分量中 $n=1$ 的正弦分量称为 $v(t)$ 的基波分量, ω_1 是基波角频率(基波频率), $n>1$ 的正弦分量称为 $v(t)$ 的谐波分量,整数 n 称为谐波次数。各次分量的幅值 V_n 与频率或角频率的关系是周期电压信号的幅度频谱,而相位 φ_n 与频率或角频率的关系是周期电压信号的相位频谱。

例如,电压周期方波信号

$$v(t) = \begin{cases} V_s, & nT \leq t < (n+1)T \\ 0, & (n+1)T \leq t < (n+2)T \end{cases} \quad (1.2.4)$$

的傅里叶级数为

$$\begin{cases} v(t) = \frac{V_s}{2} + \frac{2V_s}{\pi} \sin \omega_1 t + \frac{2V_s}{3\pi} \sin 3\omega_1 t + \frac{2V_s}{5\pi} \sin 5\omega_1 t + \dots \\ \omega_1 = 2\pi \frac{1}{T} \end{cases} \quad (1.2.5)$$

周期方波信号的波形、幅度频谱和相位频谱如图 1.2.3 所示。

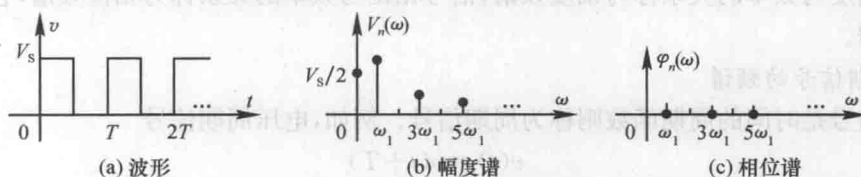


图 1.2.3 周期方波信号的波形、幅度谱和相位谱

由傅里叶级数的特性和周期方波信号的频谱实例可知,周期信号的频谱是离散谱,即频谱由直流分量($0\omega_1$)、基波分量($1\omega_1$)和高次谐波分量($2\omega_1, 3\omega_1, 4\omega_1, \dots$)组成,且幅度谱随谐波次数的递增而减小。如果截取 $N\omega_1$ 以内的分量则可获得原始周期信号的近似波形, N 越大,误差越小。

周期电压信号作用到电阻 R 上的平均功率 P 为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v^2}{R} dt = \frac{1}{R} \left(V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} V_n^2 \right) = \frac{1}{R} V^2 \quad (1.2.6)$$

$$V = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} V_n^2} \quad (1.2.7)$$

式中, $V_n/\sqrt{2}$ 是各次正弦波的有效值; V 是电压信号的有效值,等于各次分量有效值的平方和开平方。总平均功率等于各次分量的平均功率之和。所以,信号的幅度谱反映了信号的功率分布,是信号最重要的特性之一。

2. 非周期信号的频谱

如果周期 T 趋于无穷大,则周期信号变化为非周期信号。因此,非周期信号的角频率 $\omega_1 = 2\pi/T$ 是无穷小量,信号的频谱将在角频率轴上连续分布。

由数学分析可知,如果模拟信号 $v(t)$ 绝对可积,即 $\int_{-\infty}^{\infty} |v(t)| dt < \infty$,则存在下述傅里叶变换对

$$\begin{cases} V(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j\omega t} dt \\ v(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \end{cases} \quad j = \sqrt{-1} \quad (1.2.8)$$

$V(j\omega)$ 通常是复数,角度 $\angle V(j\omega)$ 称为相位谱,幅值 $|V(j\omega)|$ 称为幅度谱, $|V(j\omega)|^2$ 称为功

率谱。

例如,电压单脉冲信号

$$v(t) = \begin{cases} V_s, & -\tau \leq t \leq \tau \\ 0, & |t| > \tau \end{cases} \quad (1.2.9)$$

的傅里叶变换是

$$V(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\tau}^{\tau} V_s e^{-j\omega t} dt = \frac{2V_s}{\omega} \sin \frac{\omega\tau}{2} \quad (1.2.10)$$

电压单脉冲信号的波形和幅度谱如图 1.2.4 所示,其幅度谱是连续分布的,并且脉冲宽度 (2τ) 越窄,高频分量越多;频谱幅度与脉冲幅度和脉冲宽度之积 (τV_s) 成正比。

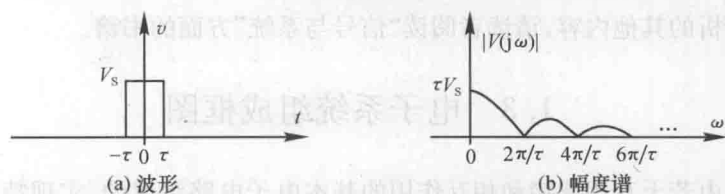


图 1.2.4 电压单脉冲信号的波形和幅度谱

在工程实际中,信号作用的时段通常是有限的,满足绝对可积条件,信号的频谱总是存在的。例如,音频信号的频谱在 $[20\text{Hz}, 20\text{kHz}]$ 范围内连续分布。对工程实际问题有重要影响的信号称为有用信号(有效信号),通常有用信号的频谱范围是有限的。表 1.2.1 列出了一些典型信号(有用信号)的频率范围。

表 1.2.1 典型信号的频率范围

信 号	频率范围	信 号	频率范围
心电信号	0.05~200Hz	调频无线电信号	88~108MHz
音频信号	20Hz~20kHz	超高频电视信号	470~806MHz
模拟电视信号	直流~4.5MHz	卫星电视信号	3.7~4.2GHz
调幅无线电信号	540~1600kHz		

3. 干扰和噪声信号的频谱

除了有用信号外,工程实际问题中还存在干扰和噪声信号。

电子电路总是处在复杂的电磁环境中。例如,自然界的雷电、电力输电线路、无线电台和电视台、电动机的启停等产生的电磁现象必然在电子电路中产生电压或电流脉冲信号,它们对电子电路的正常运行产生干扰,所以称为干扰信号。干扰信号通常用单脉冲信号近似表示,故其频谱分布与图 1.2.4 相似,包含丰富的高频分量。

噪声通常是指由于电子的不规则运动引起的对有用信号的扰动信号。例如,在电阻材料中电子总是在做无规则的热运动,对外电压引起的定向运动电流形成扰动电流,如图 1.2.5 所示。这种由于电子的热运动产生的扰动信号称为热噪声。扰动电流很小,并且是随机产生的,与定向运动电流的频率无关,具有均匀分布的功率频谱。当定向运动电流(有用信号)远大于扰动电流时,扰动电流可忽略不计。但是,当定向电流与扰动电流相当时,有用信号被淹没在扰动信号中。所以,噪声信号限制了电子系统所能处理的最小信号。

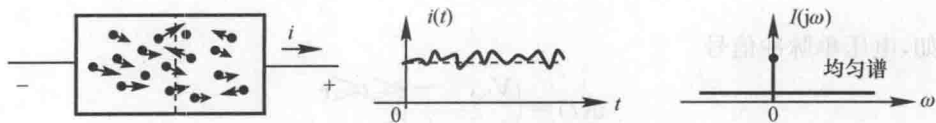


图 1.2.5 电阻中的定向电流和噪声电流

干扰和噪声对信号源和电子电路都有影响,电子系统必须对它们有一定的抑制能力。评价信号优劣的指标是信噪比 S/N ,定义为有用信号的功率与噪声信号的功率之比。信噪比越大,信号越好。评价电子系统对噪声和干扰的抑制能力用输出信号的信噪比 $(S/N)_o$ 。除以输入信号的信噪比 $(S/N)_i$,商越大,抑制噪声的能力越强。

有关信号分析的其他内容,请读者阅读“信号与系统”方面的书籍。

1.3 电子系统组成框图

电子系统是由若干互相连接和相互作用的基本电子电路组成的、实现特定功能的电路整体。电子系统的主要作用是实现电信号的产生、获取、放大、变换、传输、识别和应用等功能(或前述的部分功能),处理的对象是电信号。电子系统组成框图 1.3.1 所示。

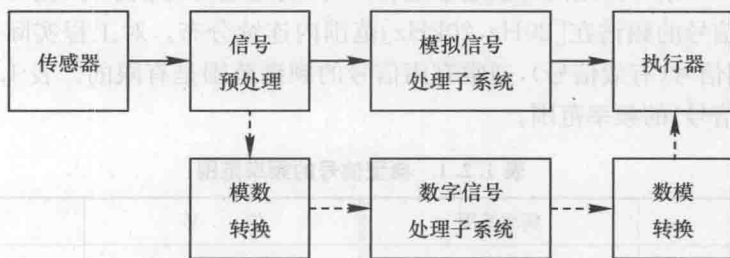


图 1.3.1 电子系统组成框图

传感器先将工程实际涉及的某些物理量转换为电信号。通常,为了避免对物理量状态的影响,传感器摄取的能量很小。所以,传感器输出的电信号很微弱(例如,微伏级或毫伏级的电压信号),并且信号不可避免地伴随着干扰和噪声信号。目前,电子电路对电信号进行可靠的各种处理必须达到数百毫伏或伏级以上,因此,通常应该对传感器输出信号进行预处理,包括信号幅度的放大和滤除干扰及噪声信号。

根据工程实际的要求,可以选择不同的信号处理操作,包括对信号的放大、运算(加法、减法、乘法、积分和微分等)、各种函数变换、频谱变换、逻辑运算等。理论上,各种信号处理操作都可以用模拟方式(图 1.3.1 中的实线箭头)或数字方式(图 1.3.1 中的虚线箭头)实现。如果采用数字方式,还要对预处理后的信号进行模拟信号到数字信号的转换。在数字信号处理后,通过数模转换电路将数字信号还原成模拟信号。最后,通过不同的执行器将符合工程实际要求的信号还原成某种物理量,实现对工程实际环境的某种操作。

数字处理子系统可以是通用的数字电路系统、计算机系统甚至计算机网络系统。通常数字处理系统比模拟处理系统可靠性好、处理精度高。目前绝大多数的模拟处理系统被数字处理系统取代,所以,人们欢呼数字时代,为数字信息处理高唱赞歌。但是,数字系统比模拟系统复杂,最致命的缺点是不能处理微弱信号,这为模拟系统保留了发挥作用的一席之地。因此,