

高等学校工程应用型 “十二五” 系列规划教材



# 电路、信号与系统分析基础

李哲英 刘 佳 钮文良 编著



科学出版社

高等学校工程应用型“十二五”系列规划教材

# 电路、信号与系统分析基础

李哲英 刘 佳 钮文良 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书为电类应用型本科和高职本科专业的“电路分析”和“信号与系统”课程教学而编写,共12章。本书突出基本物理概念和应用,侧重工程分析和设计所需的电路元件、定理和定律、直流电路、动态电路和正弦稳态电路、连续时间信号与系统、离散时间信号与系统等方面的分析概念与方法,并简单介绍了离散信号与系统的基本概念。本书最后提供了两个工程应用分析实例。本书各大部分章节后均配有思考题、练习题和实验,以使读者能通过实践性练习、特别是实验来学习并掌握电路、信号与系统的工程概念和分析设计方法。

本书可作为电气、电子、通信、机电一体化、生物医学工程、物联网工程等应用型本科专业及相关高职专业的教材,也可作为应用工程师的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路、信号与系统分析基础/李哲英,刘佳,钮文良编著.—北京:科学出版社,2016.3

高等学校工程应用型“十二五”系列规划教材

ISBN 978-7-03-047203-8

I. ①电… II. ①李… ②刘… ③钮… III. ①电路分析-高等学校-教材②信号分析-高等学校-教材③信号系统-系统分析-高等学校-教材  
IV. ①TM133②TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第008699号

责任编辑:潘斯斯 李 清 / 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

\*

2016年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:462 000

定价:49.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

电路、信号与系统相关的理论和分析方法是电类专业的重要基础课程。

从理论体系和工程应用出发,电路、信号与系统一般分为“电路分析”和“信号与系统”两门课程。历史上电路理论课程(称为“电工基础”)分为电路分析、信号系统分析和电网络分析综合三部分。20世纪60年代开始,为适应工程发展的需要,特别是半导体器件和信号处理技术的发展,电工基础课程逐渐划分为电路分析、信号与系统以及电网络分析综合三门课程。到20世纪90年代后,随着微处理器技术,特别是嵌入式技术的快速发展,以及计算机分析技术成为电路领域工程分析的基本工具,电网络分析综合退出了电路、信号与系统相关的课程体系,从而形成了当今的“电路分析”和“信号与系统”两门课程。

电路、信号与系统课程的发展历史说明两个重要问题,一个是工程电路电子化、结构复杂化的发展,要求电路分析进一步注重基本概念的应用;另一个则是智能化电路分析工具已经成为现代电路、信号与系统分析的基本工具,传统的复杂网络计算已经成为智能分析工具的基础,而不是像40年前那样全部都要人工计算。

从工程技术的角度看,有源化、系统复杂化、数字化的程度越来越高是现代电路的工程特征,智能化处理已经成为必然。这就突出了基本概念的应用,对工程技术人员提出了有关电路、信号与系统基本分析概念和物理概念的更高要求,而降低了对计算处理能力的要求。

近20年来,随着数字信号处理技术的飞速发展,信号与系统课程的基本内容中有关电路系统的概念在逐步减弱,更加突出了离散系统的内容。这无疑是技术的进步,但同时也产生了电路系统概念的弱化现象。工程实际中的各种系统,其硬件基础都是电路,电路是信号系统正常工作的保证。所以,从电子信息工程的专业特点来看,由于面对的都是电路系统,应用工程师应当掌握电路系统应用分析技术,所以对电路、信号与系统的基本概念应用提出了更高的要求。

本书正是从工程应用性人才、高等职业本科专业人才培养的角度出发,考虑到工程应用的最基本要求,突出了电路、信号与系统中基本概念的物理性和分析应用性。据此,本书介绍了电路分析最基本的方法,以及信号与系统基本分析概念与方法。同时,本书讨论的信号与系统分析方法以电路系统为基本对象。这样可以帮助初学者建立良好的电路系统概念,并正确认识工程信号。

考虑到电路与系统的分析中使用了相同的时域分析和频域分析方法,加之本书以电路系统为对象讨论有关信号与系统分析的概念和方法,所以本书把有关时域分析和频域分析的概念和方法放在有关信号与系统部分讨论。

本书包含的内容有电路分析基础、信号与系统分析基础、离散信号与系统基本概念和应用分析实例。同时,本书的最后一章还提供了几个应用电路系统的分析实例。

电路分析基础由第1章~第5章组成。第1章作为全书的基础讨论了电路分析基本问题、基本元件和基本物理定律,提出了建立电路基本模型的概念;第2章讨论了直流电路的基本分析方法和分析概念;第3章介绍了电路分析的基本分析定理和定律,以及这些定理和定律的应用概念;第4章和第5章讨论了动态电路和正弦稳态电路两种电路分析的基本工程对象,

建立了电路状态的基本概念, 以及电路基本元件、定理和定律在动态电路和正弦稳态电路分析中的应用概念和方法。

信号与系统分析基础由第 6 章~第 10 章组成。第 6 章讨论了时域内有关信号和系统的描述方法(建模)和分析概念, 特别强调了电路分析和信号系统分析的工程应用概念差别; 第 7 章介绍了连续时间信号与系统的复频域分析方法, 引入系统连接、功率、频率特性和反馈分析的基本概念, 以及相关概念的应用方法; 第 8 章讨论了与信号处理系统密切相关的连续时间信号与系统的频域分析方法, 着重讨论了频域分析方法应用的特点以及相关的基本概念, 同时也为离散时间信号和系统分析奠定了基础。第 9 章和第 10 章介绍了离散时间信号与系统的基本分析概念和分析方法, 强调了离散时间信号与系统的工程参数特征, 以及与数字信号处理(离散信号处理)的区别。

第 11 章介绍了离散信号与系统基本概念, 主要介绍有关离散信号系统(数字信号处理系统)的基本特征。由于离散信号系统的主要内容属于数字信号处理课程, 所以本书中仅进行简单介绍, 目的是强调离散时间信号系统和离散信号系统的基本差别。

第 12 章用两个简单的工程电路系统为例, 提供了有关电路、信号与系统工程分析的具体内容, 以及所关心的核心问题, 目的是向读者展示电路、信号与系统分析概念和方法在工程实际中是如何应用的。

根据作者的教学经验, 本书可以作为 56 学时或 64 学时的“电路分析基础”和“信号与系统分析基础”两门课程的教学之用, 这就意味着把“电路分析”和“信号与系统”两门课程合并为“电路、信号与系统分析基础”一门课程。这对工程应用性专业或高等职业本科相关专业的学生来说是比较合适的。另外, 本书中带有“\*”的章节可作为阅读之用而不必纳入课堂教学。

本书在编写中突出了两个特点。一个特点是必要的求解和推导过程十分详细, 便于学生阅读, 另一个特点就是强调仿真和实验, 每章之后都有相应的仿真和实验题目。这样做的目的是突出现代工程工具应用的养成。

本书基本框架及内容要求由李哲英设计, 绪论和第 1 章由李哲英编写, 第 2、3、4、5、6、10、11 章由刘佳编写, 第 7、8、9、12 章由钮文良编写。全书由李哲英统一文字和符号。

北京航空航天大学的张晓林等审阅了本书, 并提出了许多宝贵的意见和建议。本书的编写得到了北京联合大学应用科技学院教师和相关领导的大力支持, 在此对他们表示衷心的感谢。

由于是一种新的尝试, 加之作者水平有限, 本书中一定存在不足之处, 欢迎读者批评指出。

李哲英

2015 年 8 月 30 日于北京联合大学

# 目 录

前言		本章小结	46
绪论	1	思考与练习	47
0.1 相关的工程问题	1	第2章 直流电路分析基本方法	49
0.1.1 电路的工程问题	1	2.1 直流电网络结构	49
0.1.2 信号的工程问题	3	2.2 节点分析法	51
0.1.3 系统的工程问题	5	2.2.1 直流电路的节点分析方法	51
0.2 电路的物理概念	6	2.2.2 含有储能元件的直流电路 节点分析	55
0.2.1 电路元件的基本概念	6	2.3 网孔分析法	56
0.2.2 电路分析基本概念	7	2.3.1 直流电路的网孔分析方法	56
0.3 信号与系统的物理概念	9	2.3.2 含有储能元件的直流电路网孔 分析	60
0.3.1 信号的分析概念	10	本章小结	61
0.3.2 系统的物理特征	11	思考与练习	61
*0.4 方法与工具	12	第3章 电网络分析定理	64
0.4.1 从物理模型到分析模型	13	3.1 端口与电路分割基本概念	64
0.4.2 基本数学方法	13	3.1.1 端子与端口	64
0.4.3 仿真分析工具	14	3.1.2 电路分割	65
本章小结	17	3.2 戴维南定理和诺顿定理	68
思考与练习	17	3.2.1 单端口等效概念与替代定理	69
第1章 电路元件与定律	19	3.2.2 戴维南定理	73
1.1 电路元件	19	3.2.3 诺顿定理	76
1.1.1 电路基本元件	19	3.2.4 直流电路最大功率传递定理	77
1.1.2 理想运算放大器	24	3.3 电网络分析的相关定理	78
*1.1.3 理想变压器	25	3.3.1 互易定理	78
1.2 电网络基本概念	27	3.3.2 对偶原理	81
1.2.1 电路结构基本概念	27	3.3.3 特勒根定理	83
1.2.2 串联与并联	30	本章小结	83
1.2.3 线性非时变电路	34	思考与练习	84
1.3 电路基本定律	37	第4章 动态电路时域分析	88
1.3.1 欧姆定律	37	4.1 电路状态	88
1.3.2 基尔霍夫定律	38	4.1.1 电路状态的基本概念	88
1.3.3 电功率与能量	40		
*1.4 电路仿真分析	43		



4.1.2 稳态与暂态 .....	92	6.1.4 信号分析基本概念 .....	146
4.1.3 换路定律和储能元件初始值 ...	93	6.2 LTI 系统分析基本概念 .....	149
4.2 二端口电路系统 .....	95	6.2.1 激励与响应 .....	149
4.2.1 二端口电路的基本概念 .....	95	6.2.2 LTI 系统 .....	150
4.2.2 二端口电路响应分析 .....	96	6.3 LTI 系统时域分析方法 .....	152
4.3 一阶电路 .....	98	6.3.1 动态方程 .....	152
4.3.1 一阶 RC 电路 .....	98	6.3.2 时域方框图 .....	153
4.3.2 一阶 RL 电路 .....	102	6.3.3 系统响应分析 .....	157
4.4 二阶电路 .....	104	6.4 线性卷积 .....	162
4.4.1 二阶 RC 电路 .....	104	6.4.1 LTI 系统单位冲激响应与 系统输出 .....	162
4.4.2 二阶 RL 电路 .....	108	6.4.2 线性卷积计算 .....	162
4.4.3 RLC 电路 .....	110	本章小结 .....	165
本章小结 .....	115	思考与练习 .....	166
思考与练习 .....	115		
<b>第 5 章 正弦稳态电路分析</b> .....	119	<b>第 7 章 连续时间信号系统复频域分析</b> ...	169
5.1 电路参数的相量形式 .....	119	7.1 单边 Laplace 变换 .....	169
5.1.1 正弦稳态电路的相量描述 .....	119	7.1.1 单边 Laplace 变换定义 .....	169
5.1.2 无源元件的相量形式 .....	121	7.1.2 单边 Laplace 变换的基本 定理 .....	172
5.2 阻抗与导纳 .....	122	7.1.3 单边 Laplace 逆变换的 计算方法 .....	173
5.2.1 阻抗与导纳的基本概念 .....	123	7.2 LTI 系统函数 .....	177
5.2.2 阻抗和导纳的串联 .....	123	7.2.1 LTI 系统复频域分析 .....	177
5.2.3 阻抗和导纳的并联 .....	125	7.2.2 电路系统的复频域分析 .....	180
5.3 电路相量分析 .....	126	7.2.3 复频域方框图 .....	182
5.3.1 电路定律与定理的相量 形式 .....	126	7.3 零点与极点 .....	183
5.3.2 二端口网络方程 .....	129	7.3.1 奇点的基本概念 .....	183
5.3.3 谐振与策动点阻抗 .....	131	7.3.2 零点与极点分析 .....	184
5.4 正弦稳态电路的功率计算 .....	136	7.3.3 波特图分析 .....	188
5.4.1 正弦稳态功率 .....	136	7.4 系统互联与反馈分析 .....	192
5.4.2 最大功率传递定理 .....	138	7.4.1 系统互联基本概念 .....	193
本章小结 .....	138	7.4.2 LTI 系统反馈分析 .....	196
思考与练习 .....	138	7.5 系统稳定性 .....	199
		7.5.1 LTI 系统的输入输出稳定 .....	200
<b>第 6 章 连续时间信号系统时域分析</b> .....	140	7.5.2 输入输出稳定的判别方法 .....	201
6.1 信号系统基本概念 .....	140	7.5.3 负反馈提升系统稳定性 .....	203
6.1.1 信号与系统的基本概念 .....	140	本章小结 .....	203
6.1.2 信号分类 .....	143	思考与练习 .....	204
6.1.3 电路系统中的基本信号 .....	144		

<b>第 8 章 连续时间系统频域分析</b> .....	207	9.2 离散时间系统时域分析	257
8.1 周期信号的傅里叶级数展开	207	9.2.1 连续时间系统离散化	257
8.1.1 连续周期信号的傅里叶级数	207	9.2.2 LTI 离散时间系统求解	259
8.1.2 连续周期信号的频谱分析	212	9.3 离散时间卷积	261
8.1.3 周期信号的平均值与帕塞瓦尔定理	218	本章小结	263
8.2 非周期时间信号的傅里叶变换	220	思考与习题	263
8.2.1 傅里叶变换定义	220	<b>第 10 章 离散时间信号系统频域分析</b>	264
8.2.2 傅里叶变换的性质	224	10.1 Z 变换分析	264
8.2.3 电路元件的傅里叶变换: 阻抗	227	10.1.1 单边 Z 变换	264
8.3 连续时间信号频域分析	229	10.1.2 单边 Z 变换的运算性质	266
8.3.1 基本信号的傅里叶变换与频谱分析	229	10.1.3 单边 Z 逆变换	269
*8.3.2 调制信号的频谱特征	232	10.2 离散时间 LTI 系统 Z 变换分析	273
8.3.3 时域取样和频域取样	234	10.2.1 离散时间 LTI 系统的 Z 域表示	273
8.4 连续时间 LTI 系统频域分析	237	10.2.2 离散时间系统的计算结构	277
8.4.1 系统频域分析	238	10.3 离散时间傅里叶分析	281
8.4.2 理想滤波器	240	10.3.1 离散时间傅里叶变换	281
8.4.3 因果系统与理想滤波器	243	10.3.2 离散时间 LTI 系统频域分析	286
8.4.4 阶跃响应与信号的测不准原理	245	本章小结	288
8.4.5 频率归一化及其应用	247	思考与练习	288
本章小结	249	<b>*第 11 章 数字信号与系统</b>	290
思考与练习	250	11.1 数字信号处理基本概念	290
<b>第 9 章 离散时间信号与系统时域分析</b>	253	11.2 数字信号处理系统分析	291
9.1 离散时间信号与离散时间信号处理	253	11.3 离散傅里叶变换	293
9.1.1 离散时间信号与离散时间系统基本概念	253	本章小结	294
9.1.2 信号时域取样与恢复	255	<b>*第 12 章 电路、信号与系统分析实例</b>	295
		12.1 交流放大电路分析	295
		12.2 理想运算放大器应用分析	299
		<b>参考文献</b>	304



# 绪 论

电路、信号、系统，这是电类工程的三个重要基本概念，描述了电类工程的基本技术。电路描述了电气信号处理或功率变换的物理装置，信号描述了电路的处理对象，系统则描述了电路、信号处理或功率转换的功能和技术特征。

有关电路、信号与系统的课程一般分为“电路分析”和“信号与系统”两门专业核心课程。电路分析是有关电路技术的基本分析工具，信号与系统提供了有关信号和系统的分析方法。这两门课程为相关本科专业提供了工程分析基本方法，对有关硬件技术课程或数字信号处理课程具有奠基性的作用，如模拟电路、数字电路、通信电路、集成电路设计、嵌入式系统原理、计算机接口技术、传感器应用等技术课程，都是以电路分析、信号与系统作为基本分析工具的。

从研究目标上看，电路分析课程解决的是电路建模以及电压(或电位)、电流的计算问题，信号与系统课程解决的是信号和系统建模以及系统特性分析问题。由此可知，电路分析、信号与系统必然与物理概念紧密相连，并且需要根据研究目标选择相应的数学工具。

对应用性本科或高等职业本科专业来说，重要的是掌握与电路系统密切相关的电路分析、信号分析和系统分析的基本概念和方法，对分析方法和基本概念的物理意义有深刻认识，并能在工程活动中灵活应用相关分析方法和基本概念。

从物理上理解电路、信号与系统，用数学方法描述物理事实，这就是电路、信号与系统这门课程的核心。

作为入门，本章通过对电路、信号和系统的工程描述，帮助读者建立电路、信号和系统的基本工程概念，为其他各章的学习打下基础。

## 0.1 相关的工程问题

电路、信号与系统分析是随着科学研究与工程技术发展而逐步形成的工程分析理论与技术。从 150 年前的发电、送电和电能应用，到当前的电子信息技术应用，工程分析、设计中不断地提出各种与电路分析、信号分析和系统分析相关的问题。工程技术需要针对电磁应用具有普遍意义的工程处理理论与方法，这就是具有普遍应用意义的电路、信号与系统分析理论，根据分析理论建立各种具有工程实用意义的分析方法。在有关电路问题的分析中，电路、信号与系统理论和方法具有基础性的作用，可以说，没有电路、信号与系统分析理论和方法，就没有现代电气、电子和信息工程。

### 0.1.1 电路的工程问题

什么是电路？为什么要分析电路？怎样分析电路？这是电气电子工程的三个基本问题。工程技术的目的是提供设备和工具，电气电子工程技术的目的，就是提供产生电能和利用电能的设备与工具。所以，电气电子工程领域中的这三个问题，是电气电子工程师所面对的基本工程问题。

电路的工程问题包括电路描述(解决什么是电路的问题)和电路分析(解决为什么分析和怎样分析的问题)。在工程实际中,分析电路的首要问题是用工程方法描述电路,这个描述包括电路结构、物理参数及其相互的数学关系。通过对电路结构和物理参数的描述,可以建立针对电路电压和电流的分析模型,分析模型就是基于物理模型的数学表达式。

为理解电路分析的基本概念,需要先了解工程中的电路问题,以下是几个具体的例子。

(1) 照明系统是电能应用的一种。在给定供电电压的情况下要确定照明电路的最大电流,这时需要先确定供电线路和灯泡在给定电压条件下能够引起的电流。如果不能确定照明系统所需的最大电流,就不能确定对供电电源和配电线路的功率要求,也不能保证系统安全。显然,这就是要建立照明系统供电电压与电流的分析关系,这个分析关系就是对问题的描述,或者说是描述问题的数学模型。在物理电磁学中已知,电压和电流的分析关系满足欧姆定律,因此可知,如果能用电路元件代替照明电路中的导线和灯泡,就可以根据欧姆定律确定照明系统电压与电流之间的分析关系。图 0-1-1 是一个简单照明电路的示意图。

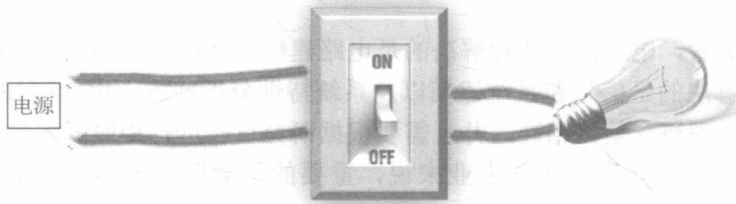


图 0-1-1 最简单的照明电路

(2) 在日常生活中,经常需要把交流电网提供的交流电(AC)转换为直流电(DC),这种交流到直流的转换(AC-DC)装置称为整流器。整流器一般由 AD-DC 转换电路和保护电路组成。一般情况下 AD-DC 转换电路输出的直流电压必须能满足设计要求,所以,工程实际中需要确定输出直流电压与输入交流电压之间的关系。从数学上看,就是提供一个代表输出直流电压和输入交流电压幅度的分析模型。为建立这个分析模型,需要首先确定可以描述电路行为的元件和元件构成的电路结构,然后根据有关的物理基本定律建立分析模型。图 0-1-2 是整流器输入交流电压波形和整流器输出的直流脉动电压波形。

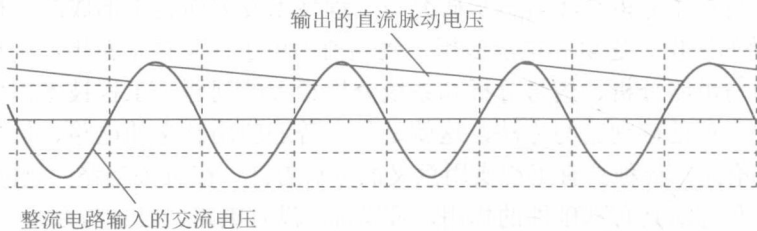


图 0-1-2 某整流电流的输入交流电压与输出直流脉动电压

(3) 手机中需要使用放大器来驱动扬声器(如图 0-1-3 所示),在设计时必须确定放大电路的电流输出能力,以保证最大音量时电路能正常工作。这就是要计算给定电源电压和输出最高电压幅度情况下放大器的最大输出电流,这个电流必须是在放大器安全范围以内。为此,需要建立放大器电源电压、输入电压与输出电压和电流之间的分析关系(即数学表达式)。这时,首先要用电路基本元件构建一个放大器电路模型,然后根据基本电学定律建立电源电压、输

入信号电压与输出电流之间的数学方程，再用电路分析提供的分析方法计算输出电流。

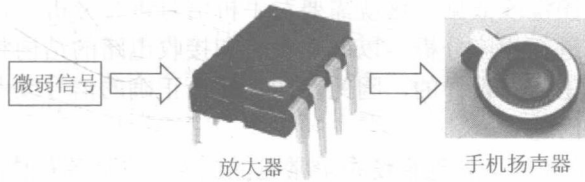


图 0-1-3 扬声器驱动电路示意

(4) 信号发生器是重要的应用电路。从数学上看，一般信号发生器都属于振荡电路，即信号发生器原理是某个周期波形的数学表达式，如  $f(t) = A\sin\omega_0 t \sin\omega t$  (其波形见图 0-1-4)。用一个具体电路来实现这个函数时，首先需要利用电路基本元件构建一个电路模型，再利用电路分析的方法推导出输出信号幅度、频率与电路元件参数、电源电压之间的数学方程，通过求解方程获得输入信号幅度、频率与电路参数、电源电压的关系。显然，这时需要掌握不同元件的组合与连接方式，并用电路元件构成电路模型来表示振荡器的数学模型。

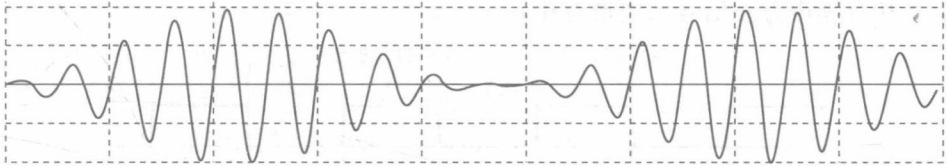


图 0-1-4  $f(t) = A\sin\omega_0 t \sin\omega t$  的波形

上述几个例子说明，电路的基本问题包括电路描述和分析方法。这就要提供电路基本元件和电路结构所代表的基本物理电磁学规律。

上述讨论指出，电路的工程问题可以归结为如下几个问题。

- (1) 如何确定描述电路的基本元件。
- (2) 如何建立基本元件之间的连接关系。
- (3) 如何根据元件及其连接关系建立电路的分析模型。
- (4) 如何处理电路的分析模型。

## 0.1.2 信号的工程问题

电路系统中的信号，是指各种电路所处理的电压或电流信号。从物理电磁学的角度看，电压和电流代表了物理世界的基本信息，所以电路系统的处理对象就是电信号。

工程中的信号种类繁多，信号形式各有不同，所以电路对信号的处理具有极强的针对性，例如，模拟电路只能处理模拟电信号，数字电路只能处理数字逻辑电平信号等。在分析和设计电路时，首先需要利用工程参数来描述信号，这样才能确定处理电路的类型、功能和性能指标。

信号的工程问题包括信号的分类与描述方法。信号分类，就是根据电路系统的基本性质，来确定信号基本特征，而信号的描述方法，则是给出信号的数学表达式，也就是建立信号的数学模型。信号模型分析的结果，是电路设计的基本依据之一。

以下是信号工程问题的几个具体实例。

- (1) 手机是移动通信系统的终端设备，其通信功能是发送信号和接收信号。发送信号时利

用调制信号把语音、图像或手机中的数据发送给基站，接收信号时通过对接收到的调制信号进行解调来还原语音、图像或数据。这就需要对手机信号进行分析，特别是对发送和接收电路所要处理的调制信号进行相应分析，以确定发送和接收电路的结构和参数，为电路和设计提供依据。手机信号是工程师设计的，因此，如何设计正确的信号或者如何建立正确的信号发生模型是重要的工程问题

(2) 电压信号是通信和信息处理系统中最常见的信号，也是各种传感器所提供的信号。为了准确测量电压信号，需要对被测信号进行详细的描述，这种描述就是建立被测电压信号的数学模型。信号数学模型提供的参数包括电压幅度、频率、波形特征等，这些参数是设计电压测量电路的依据。因此，在工程实际中必须能够正确描述被处理的电压信号。电压信号代表的物理意义比较复杂，所以建立正确的电压信号模型是信号处理中头等重要的问题。

(3) 在电气、电子系统中，凡是不需要的信号都称为干扰信号或噪声。为了保证系统正常工作，就必须把干扰信号限制在一定范围内。要限制或抑制干扰信号，就必须对干扰信号进行正确的描述，建立干扰信号的模型，通过模型分析找出抑制或消除干扰信号的措施。由于干扰信号的来源十分复杂，所以，建立干扰信号模型是一件十分复杂的工作。图 0-1-5 是无噪声方波信号和有噪声方波信号的波形对比。

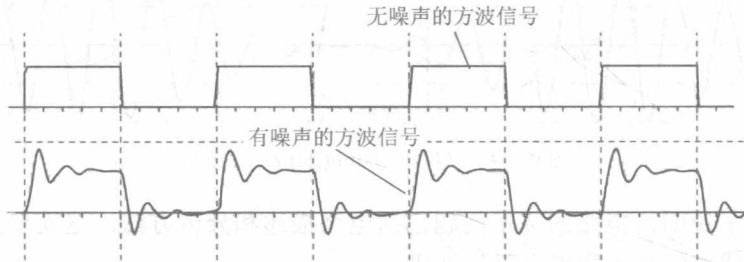


图 0-1-5 噪声对信号的影响

(4) 随着电子信息技术的飞速发展，电子系统在生物医学领域得到了广泛应用。电子系统可以测量各种生命信号，这些被测量的生命信号是临床诊断和疾病治疗的重要参考，如图 0-1-6 所示的心电图信号。这就提出了一个问题，即如何建立生命信号的模型，以便为相关的电路设计提供依据。

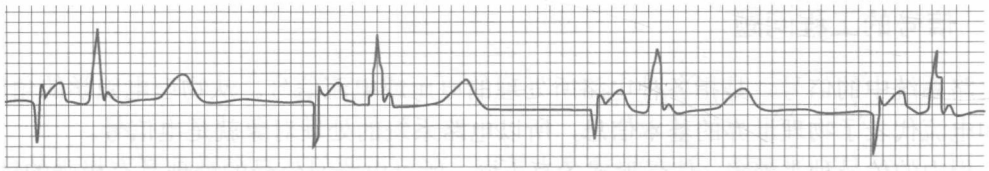


图 0-1-6 心电图(ECG)信号

这几个例子说明，信号的工程问题之一就是如何正确描述信号并建立正确的信号模型。信号的另一个工程问题是分析信号的方法，这种方法必须满足工程分析和设计的需要，能够提供电路分析和设计所需要的基本参数，例如，手机信号的分析结果就必须能提供有关幅度、频率的基本参数。

信号的工程问题可归结为如下几个方面。

- (1) 如何描述信号并建立相应的数学模型。
- (2) 如何确定或分析信号的基本特征。

### 0.1.3 系统的工程问题

系统通常用来指能够实现某个具体功能并具有相应技术性能的物理装置。系统可大可小，在工程实际中，可以把放大器看成系统，也可以把整个计算机网络看成一个系统。

与电路分析不同，系统分析所关心的是功能和性能。所以，系统的工程问题就包括对系统功能的描述和性能分析方法。

系统描述与电路描述不同，这里不关心使用什么物理手段来实现系统，而是关心系统中给定变量之间的函数关系，这个函数关系就代表了系统的功能。通过对函数关系的分析，可以获得系统的技术性能。这就是说，系统的工程问题是建立系统模型和分析方法。

例如，要建立振荡器的系统模型，就是要根据功能要求建立函数模型，这个函数模型代表了系统的基本功能，通过分析确定振荡器的函数模型并据此确定各项参数的具体指标。可见，系统的工程问题侧重功能和技术性能，而不考虑具体的实现技术。

以下几个例子可以用来说明系统的工程问题。

(1) 滤波是信号处理的重要手段，其功能是把夹杂在信号中的噪声除掉。这就需要根据信号的性质建立具有信号选择能力的系统，即滤波系统。从数学的角度看，这相当于对输入信号进行数学计算，通过计算产生新的信号，新的信号就是有用信号。由此可知，要设计滤波系统，首先要确定计算公式，这个计算公式就是滤波系统的分析模型，其次，还需要对模型进行相应的分析以便确定模型中的具体参数。

(2) 数字信号处理系统的功能是按照要求对数据进行某种处理，如图像增强、数据压缩、调制解调等。这时首先要解决的是如何根据处理要求建立相应的算法，这个算法的数学表达式就是系统模型，接下来还需要通过算法分析获得与处理数据相匹配的性能指标参数。

(3) 太阳能发电系统又叫光伏系统，其功能是利用半导体把太阳能转换为电能。作为发电系统，对输出电压类型和幅度、输出功率有着严格的要求，否则就无法确定用电设备。同时，半导体光电池的光-电转换能力受转换效率的影响，这就需要根据转换效率和输出功率要求来确定半导体光电池的数量。所以太阳能发电系统的转换效率、电压和输出功率及其相互的数学关系就是系统的三个基本参数和分析目标。

这三个实例说明，面对复杂的处理对象和功能、性能要求，系统的工程问题也比较复杂。在工程实际中，系统的工程问题可以归结为如下几个问题。

- (1) 如何对系统分类。
- (2) 如何描述系统并建立函数模型。
- (3) 如何分析系统的函数模型。

**例 0-1-1** 在节日或喜庆的时候，人们有时用彩灯来装点环境。对彩灯的要求就是在给定电源电压和功率消耗的情况下，按要求闪动。试分析彩灯系统的工程问题。

**解** 根据题意可知，彩灯系统应当包括电源、连接线路和彩灯三大部分。这里可以认为包括了如下工程问题。

- (1) 根据设计要求确定彩灯数量。
- (2) 根据彩灯的电压和功率要求选择彩灯类型。
- (3) 在电源、功率和彩灯限制下选择符合要求的连接导线。

由此可见，这是一个完整的供电和用电系统。上述三个主要工程问题的分析都涉及系统描述的问题。

## 0.2 电路的物理概念

电路是用电路元器件组合而成的工程装置。在工程实际中对电路和系统没有严格的区分,当重点考虑电路参数(如电位、电流)、元器件技术特性时,就属于电路分析;当重点考虑信号处理功能时,就属于信号与系统分析。总之,电路分析的基础是物理参数和定律,信号与系统分析的基础是信号性质和系统功能与性能。

电路分析是工程特征非常明显的理论体系,是在物理电磁规律基础之上总结出来的工程分析概念和方法。

### 0.2.1 电路元件的基本概念

用来组成电路装置的元件或器件统称为电路元器件,电路元器件是具有功能独立性的物理实体,既可以是材料电磁参数的物理实体(如电阻器、电容器、线圈、变压器等),也可以是某个电路功能的物理实体(如集成电路、温度传感器、晶体管、继电器、波段开关、按键等)。

#### 1. 电路元器件基本物理特征

理论上,元件是指具有单一电磁参数的物理实体,器件则是指由元件组合而成、具有特定功能的独立物理实体。在工程中,无论是元件还是器件都是一个独立的物理实体,为了方便往往统称为元器件。

电路分析的目的在于描述(建模)和分析电路的功能、物理参数和技术性能,如果不对元器件做分析就难以达到目的。因此,电路分析方法采用电路基本元件的分析概念,把所有电路元器件都看作是由基本元件构成的电路。

由此可知电路元器件的物理特征如下。

- (1) 任何电路元器件都能用电路基本元件来描述。
- (2) 电路基本元件代表了物理电磁现象并与物理电磁规律相对应。

电路元器件的物理特征说明,电路分析的内容和结果具有明显的物理意义,任何电路元器件的技术参数必须具有确定的物理意义和量纲。

从物理电磁学不难得知,电路基本元件必然包括电阻、电容和电感、电压源和电流源,这是描述电路元器件的基本物理概念。

**例 0-2-1** 图 0-2-1 的电路中,元件 A 一端电位是 5V DC,另一端电位是 3V DC,元件中的电流是 5mA DC,是否可以把这个元件看成一个电阻?如果可以,这个等效电阻的阻值是多少?

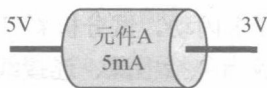


图 0-2-1 电路元件

**解** 可以。根据物理电磁学中的欧姆定律,这个电阻的阻值是

$$R = \frac{5-3}{5 \times 10^{-3}} = 0.4 \times 10^3 = 0.4(\text{k}\Omega)$$

这个例子说明,电路元件描述了电压、电流之间的关系。这里把电路元件用一个电阻来代替,就是建立了元件模型,这个模型代表元件端电压和电流之间的关系。



## 2. 集总参数电路元件概念

上述讨论说明, 电路元件和器件具有鲜明的物理特征, 每一个基本元件都与具体的物理现象和定律相对应。这就会提出一个问题, 既然电路基本元器件符合电磁定律, 而电磁现象的特点又是以场的形式全空间分布, 这是否说明电路基本元件具有无限大的体积? 这是一个非常实际的问题, 也正是电路元件所具有的简化特征。根据物理学对材料电磁特征分析的结论可知, 对电导率相差较大的材料来说, 可以认为电能全部集中在导电特性好的材料中, 这就预示着可以认为电能全部集中在电路基本元件中而不是全空间分布。这就把空间分布的电磁问题简化为“路”, 即电能沿着电路基本元件构成的路径分布和传播。或者说, 集总参数的概念就是: 电流只存在于元器件内部。

显然这是根据材料特征对电磁能量分布进行了限制的结果, 是一种简化分析概念。这个简化分析概念称为“集总参数”, 电路基本元件就是集总参数元件。图 0-2-2 是集总参数元件简化特征的示意, 图中空间分布参数是考虑到电场在全空间分布时, 导体及其周围存在电场和电流密度, 但此时  $J_2 \approx 0$ 、 $J_3 \approx 0$ , 这正是集总参数的情况。在集总参数条件下, 尽管电源  $U$  产生的电场  $E$  在空间有分布, 但导体外的空间中电流为 0, 计算中可以不考虑。所以说, 集总参数是一种假设, 目的是简化分析。

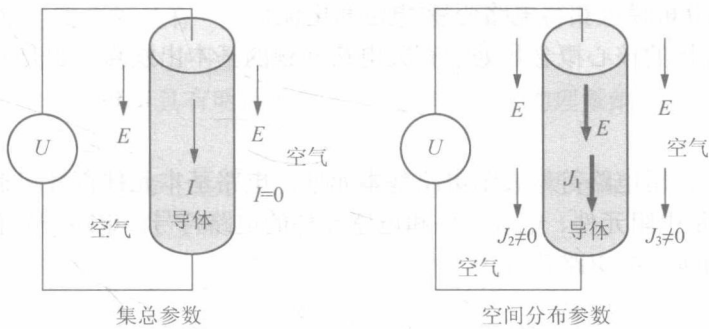


图 0-2-2 集总参数的简化特征

对电参数而言, 一般情况下集总参数假设引起的误差非常小, 忽略后不会引起很大误差, 同时, 在不能忽略集总参数计算引起的误差时, 还可以通过增加集总参数电路基本元件来模拟分布参数的效果。所以, 集总参数的电路基本元件把电磁场现象转变为电路行为, 极大地简化了工程分析。

电路基本元件是描述电路系统的基本单元, 代表了材料的物理电学特性, 每一个基本元件都与一个电磁现象相对应, 具有明确的物理意义。利用电路基本元件可以描述复杂的电路系统, 这个描述结果就是电路系统的分析模型。

### 0.2.2 电路分析基本概念

电路分析的基础是物理电磁学, 任何电路分析的结果都具有明显的物理意义。通过对材料的分析可知, 仅讨论电能问题时可以认为电能量全部集中在导电材料(包括导体)中, 把分布在空间的电能集中在电路元器件和连接导线中, 从而形成了电能的“通路”, 所以, 电路分析的基本物理意义就在于能量全部集中在元器件构成的电路中。也正因如此, 电路分析的所有变量、表达式和结果都具有明确的物理意义和物理参数的量纲。

## 1. 电路的分析概念

电路是由电路元器件通过导线连接而成的物理实体，所以电路就是一个电磁系统，具有电磁系统的全部物理特征。另一方面，电路的描述和分析中关心的不再是具体元器件对电压或电流的作用，而是通过导线连接成系统之后各连接点上的电位、元器件和连接导线中的电流。所以，电路分析不像电磁场分析那样关心电磁能量的空间分布，而是关心指定通路中的电流和连接点的电位，按照元器件构成的通电路径描述和分析。

在工程分析中，如果对实际电路进行完整描述，会使问题变得十分复杂。根据电路基本元件的概念，工程分析中总是使用电路基本元件把电路抽象为集总参数电路，忽略连接形式和连接线路的电参数，进而获得突出描述电路特征和参数的“抽象电路”，这个抽象电路称为“等效电路”，意思是与物理电路具有相同效果。

电路元器件连接点上的电位和元器件中的电流，代表了电路的状态。所以，全部电位和电流是电路分析的基本目标。

由上述讨论可以得知，电路分析核心概念包括如下几点。

- (1) 用等效电路描述物理电路，作为分析基础。
- (2) 在等效电路上应用电路定理、定律建立分析模型。
- (3) 通过求解分析模型获得电路变量(电位和电流)。

这三个电路分析的核心概念是处理有关电路问题的基本出发点，也是完成电路分析的三个基本步骤。

## 2. 等效电路

在工程分析中，用电路符号表示电路基本元件。电路基本元件符号包括元件图形和参数两部分，图 0-2-3 是电阻元件、电容元件和电感元件的电路符号。电路符号有不同的标准，本书采用国家标准所规定的电路符号。

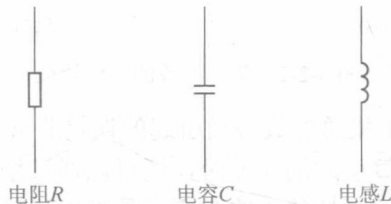


图 0-2-3 集总参数的简化特征

电路符号组合连接而成的符号图可以描述任何电路元器件或电路系统，电路基本元件符号描述的电路元器件与物理上的元器件具有相同电路特征和技术特性，工程上把这种符号图称为等效电路。与实际电路不同的是，等效电路中没有导线，电路基本元件之间的连接线没有任何物理意义，仅表示连接关系。所以说，等效电路是对实际电路的抽象，突出了电路特性，忽略了布局结构和连接导线。由此可以总结出等效电路的特点如下。

- (1) 由电路基本元件连接组合而成，具有与物理电路相同的电路特征和技术特性。
- (2) 电路中的连线仅代表连接关系，没有任何物理意义。
- (3) 等效电路是理想电路，忽略了物理电路的一些因素，突出了主要电流通路和参数。用电路基本元件描述所有元器件或电路系统是电路分析的基本概念和建模方法之一。

## 3. 电路分析的物理特征

电路分析的物理特征，是指电路分析所蕴涵的物理意义。电路分析的对象是物理电路，

要解决的问题是通过分析获得具有物理意义的电路特征、性质和具体参数。这就是说, 电路分析的过程要严格遵循物理电磁定律, 电路分析的结果要具有具体的物理意义而不是单纯的数量。

电路分析的物理特征如下。

(1) 电路定理和定律是物理电磁理论在电路中的表现形式, 必须严格遵守。利用集总参数概念, 可以把物理电磁理论中的基本定理简化为电路定理和定律。电路定理和定律具有严格的物理意义。

(2) 集总参数电路基本元件是对物理电磁现象的特殊和简化描述, 是构建任何电路的基本单元。电路基本元件构建的等效电路代表电路结构、性质和参数, 建立在等效电路基础之上的变量关系代表了电路基本特征。

(3) 对等效电路应用电路定理可以建立电路中变量(电位和电流)之间的函数关系, 这个函数关系就是电路的数学模型或者称为分析模型。

(4) 电路分析针对的是结构不随时间变化的电路, 分析模型与等效电路一一对应, 等效电路与物理电路一一对应, 所以, 电路分析模型及其解答一定是唯一的。这就是说, 电路分析的对象是结构静止的, 不同结构的物理电路对应不同的等效电路, 电路结构和物理特征不能随时间变化。可知电路分析具有“定时观察”的特点, 也就是说, 电路分析针对某一结构的电路, 如果这个电路结构或参数发生变化, 则必须另行分析。

(5) 等效电路和分析模型具有明确的物理意义和对应的物理量纲, 分析结果具有明确的物理意义和对应的物理学量纲。

电路分析的物理特征实际上也提供了判断分析过程和结果是否正确的方法, 这就是通过检查量纲来判断分析结果是否正确。

### 0.3 信号与系统的物理概念

信号是电路的处理对象, 是电路、系统分析和设计的基本出发点。在工程实际中, 有两种信号, 一种是自然事物的外在表现(如物体的温度、环境的湿度、物体振动等); 另一种是为了实现某种目的而由电路产生的电压或电流(如数字逻辑电平、正弦波电压、调制信号等)。任何一个电路系统都是针对特定信号而设计的, 如收音机所能处理的信号是高频调制信号, 心电图记录仪所能处理的是人体产生的心电信号, 数字电路系统所能处理的是具有时序关系的数字逻辑电平信号组等。因此, 信号与系统之间存在着密不可分的关系。

信号分析的目的是提供信号的基本特征, 通过分析建立信号的模型, 信号模型是系统分析的基本出发点。

系统分析的目的是建立系统模型, 有了系统模型就可以用信号模型对其进行功能和性能检验, 并通过分析获得系统特征和性能。如果确定使用电路作为系统的实现手段, 则由此可确定系统在处理某类信号时所具有的物理特性。

值得指出的是, 系统分析的基础可以是具体物理电路, 也可以是系统的设计要求。在进行系统分析时, 最关心的不是实现技术, 而是系统所具有的功能和技术性能, 确定系统的功能和技术性能后, 再利用信号模型对其进行分析, 以确定是否满足信号处理的要求。最后利用电路或其他物理手段具体实现功能和技术性能。由此可知, 为满足系统实现技术的要求,