

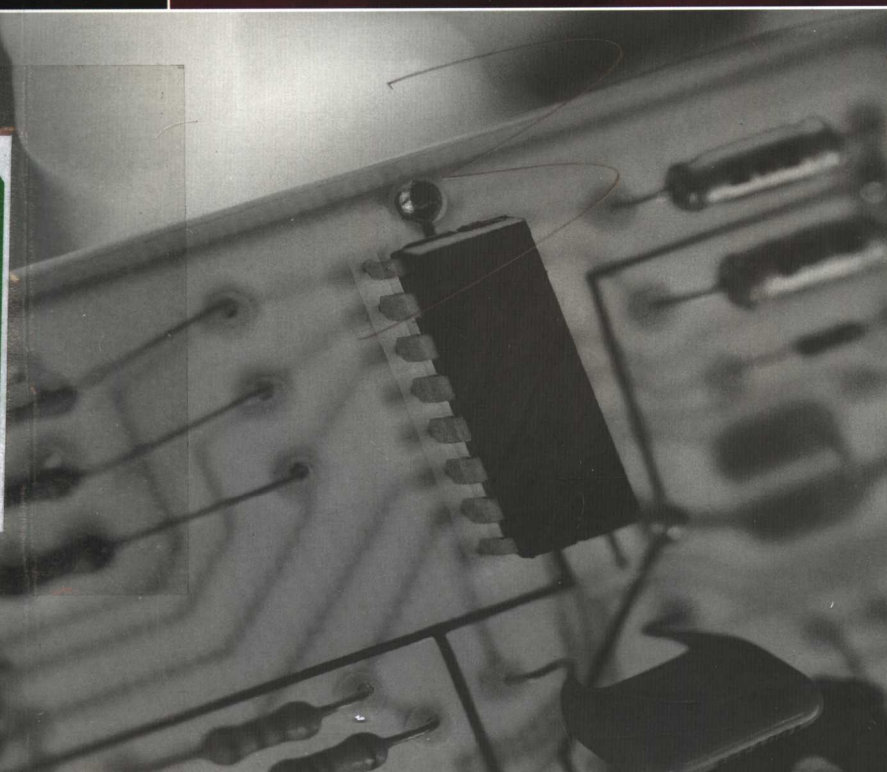
HZ BOOKS
华章教育

21
世纪

高等院校电子信息类本科规划教材

模拟电子线路分析 与Multisim仿真

李哲英 骆 丽 李金平 编著



机械工业出版社
China Machine Press

21
世纪

高等院校电子信息类本科规划教材

TN710.02/20

2008

模拟电子线路分析与Multisim仿真

李哲英 骆 丽 李金平 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书从教学实践出发,着重于电子线路的模型分析、仿真及应用设计方法。全书共分8章,分别讲述了电子线路基本元器件的工作原理、模型分析、电路结构和参数分析;集成运算放大电路的分析、模拟信号处理电路的仿真分析、功率电路的仿真分析。

本书可作为高等院校电子信息类等相关专业的模拟电子线路、模拟电子技术等课程的教材。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路分析与 Multisim 仿真 / 李哲英, 骆丽, 李金平编著. -北京: 机械工业出版社, 2007.8

(21 世纪高等院校电子信息类本科规划教材)

ISBN 978-7-111-22052-7

I. 模… II. ①李… ②骆… ③李… III. ①模拟电路—电路分析—高等学校—教材 ②电子电路—电路设计: 计算机辅助设计—应用软件, Multisim—高等学校—教材 IV. TN710 TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 117700 号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 冯 蕾

北京慧美印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 21 印张

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换
本社购书热线: (010) 68326294

前 言

对于电气与电子信息类本科学生来说,最需要的是了解并掌握电子线路的基本分析方法和对电路工作条件的分析。由于教科书中只能给出基本的分析理论和设计技术,无法提供相关的专业背景和工程应用知识,因此,本科学生一般都是通过实验来验证和掌握相应的概念。但由于时间和实验条件限制等问题,学生在学习时很难通过实验对问题进行研究,更无法深入地学习如何在工程应用条件下对电子线路和系统进行分析。

随着 EDA 技术的发展,电子线路的分析与设计越来越多地依靠 EDA 工具来完成。EDA 工具为现代电子技术的教育和学习提供了充分的实验手段和条件,成为现代电子技术等相关课程教学活动的重要工具,在很大程度上解决了电子线路课程教学中的基本问题。

使用 Multisim 工具软件可以达到如下目的:

- 1) 提供通过简化电路模型来学习相应的电子技术和理论的基本工具。
- 2) 通过软件工具的应用,使学生了解和掌握更多的电子系统应用的概念、知识和技术。
- 3) 配合实验和理论教学,使学生建立以应用能力和创新能力培养为目标的学习观念。
- 4) 培养学生运用 EDA 工具进行电子线路分析和仿真应用的能力。

作为信息技术和电子技术的一个重要分支,EDA 工具正在发挥极大的作用,成为学习和应用现代电子技术的重要内容。Multisim 是目前国际上流行的 EDA 软件工具之一,其基本内核是 Spice,因此, Multisim 提供了十分灵活的电子线路仿真研究方法,既可用于对电路进行理想情况的仿真研究,又能用于设定条件下的仿真研究。

用 Multisim 作为基本工具来对电子线路进行分析和仿真时应当注意如下两个问题

1) 实验目标的可行性。EDA 工具提供的是建立电子线路或电子元器件模型的工具,通过仿真运算来模拟实际电路的工作。因此,能否使用 Multisim 完成对电子线路的分析和仿真,其基础就是能否建立相应的电路或器件模型。同时, Multisim 提供的是建立模型的手段和方法,只有符合所提供的手段和方法,才有可能建立相应的电路或元器件的模型。因此,在使用 Multisim 研究电子线路时,应当注意 Multisim 对仿真分析的限制,例如频率、仿真时间长度、取样点数等。

2) 实验结果的正确性。由于仿真的基础是电子线路的模型,所以,实验结果的正确性与模型直接相关。对仿真工具来说是,正确性是重要的技术特性之一。分析与仿真结果的正确性是建立在坚实的电子技术理论和技术基础之上的,所以,对于初学电子线路的学生来说要判断仿真结果是否正确是很困难的。只有通过知识和经验的积累,并配合实际电路设计和测试分析,才能逐步掌握对仿真结果正确性的分析技术。

本书的内容以 Multisim 为基本工具,对电子线路中的最基本问题进行描述和分析。通过本书的学习,可以掌握电子线路分析与仿真的基本知识、设计应用技术,以及如何利用仿真工具研究电子技术的相关问题。

在电子技术类课程中使用 Multisim 软件工具,可以使读者认识基本电子元件的技术特性、学习分析电路的基本概念,以及了解电子技术的实际约束对理想设计的影响,初步了解工程实

际中的主要约束条件。同时,还可以通过 Multisim 仿真实验和练习,了解并掌握电子器件的基本参数特性和应用分析方法,了解并掌握模拟电路和数字电路的基本测量观察技术。此外,通过与实际电路的对比,学习电子技术设计中的非理论因素的基本概念,掌握必要的工程应用知识。

本书共 7 章。

第 1 章绪论。绪论中介绍了有关电子线路分析和设计所需要的基本分析概念,包括信号和系统分析的方法与概念,以及仿真工具应用中的必要技术与概念。绪论的内容将成为全书讨论的基础。

第 2 章到第 7 章。第 2 章至第 4 章讨论了基本半导体器件(包括集成运算放大器)的工作原理、模型分析和参数分析。第 5 章集中讨论了电子线路的分析概念和分析方法,重点讨论了电子线路的定性分析方法、反馈和频率特性分析方法。第 6 章讨论了基本应用电路,重点讨论了集成运算放大器应用电路,包括电路结构、分析概念和分析方法。第 7 章讨论了电子线路中的功率概念和功率处理方法。同时,这部分集中介绍了电子元器件和电子线路的仿真分析技术,其中包括一些仿真实验的操作方法和技巧。在模型分析概念基础上,这部分通过大量例题向读者介绍如何对模拟电子线路和元器件进行仿真分析和研究,以及如何使用 Multisim 对设计结果进行验证。通过这部分的学习,读者可以学会基本的电子线路模型分析和仿真分析技术。

本书的内容曾在 2001 年至 2005 年作为北京交通大学电子工程系学生的讲义,同时也曾作为电子系统仿真技术的教材。

本书第 1~6 章由李哲英教授编写,第 7 章由骆丽教授编写,李金平教授参与了部分章节的编写。刘元盛工程师、许立群工程师、周晓龙讲师完成了例题仿真实验工作。此外硕士研究生赵俊良、陈婷婷、韩玺、李博、李争、李月梅、刘翔等参与了部分仿真实验的验证工作。全书由李哲英教授统编。

本书要特别感谢清华大学的董在望教授和北京理工大学的罗伟雄教授,他们对本书编写给予了极大的支持和热情的关注。同时,还要感谢北京航空航天大学张凤言教授和清华大学的刘宝琴教授,他们都认真地审阅了本书的全部内容,提出了十分重要的建设性意见。最后,作者向掌宇公司(北京)的周光甫先生和潘文升先生,感谢他们为本书的编著提供了仿真软件支持。

由于时间仓促,再加之仿真实验涉及到的理论和技术十分广泛,所以本书中定会存在一些问题,敬请广大读者不吝赐教。

李哲英

2007 年 8 月

注:本书因使用仿真软件,部分电路图中元器件符号和用法与国标不一致,特此说明。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电子系统分析基本概念	1
1.1.1 电子线路模型的概念	1
1.1.2 电子线路分析的基本内容	4
1.1.3 电子线路的实验分析方法	6
1.2 电子线路的信号特征	8
1.2.1 信号分类	8
1.2.2 信号描述	9
1.2.3 信号处理基本概念	11
1.3 电子线路的系统特征	12
1.3.1 系统的基本概念	12
1.3.2 系统的描述方法	14
1.4 现代电子系统的分析和设计工具	17
1.4.1 仿真分析基本概念与仿真工具	17
1.4.2 仿真平台的基本应用要领	19
1.4.3 Multisim2001 提供的分析工具	20
本章小结	22
练习题与习题	22
第 2 章 基本半导体元件	24
2.1 半导体导电的概念	24
2.2 PN 结与二极管	25
2.2.1 PN 结	25
2.2.2 二极管	27
2.2.3 二极管电路模型	32
2.3 双极三极管 (BJT)	36
2.3.1 三极管基本结构、符号与工作原理	37
2.3.2 三极管分类	40
2.3.3 三极管的技术特性	41
2.3.4 三极管电路模型	46
2.4 场效应晶体管	53
2.4.1 场效应晶体管结构、符号与工作原理	54
2.4.2 场效应晶体管的技术特性	59

2.4.3 场效应晶体管电路模型	60
2.5 其他半导体元件	67
2.5.1 晶闸管	67
2.5.2 光电器件	68
本章小结	71
练习题与习题	71
第3章 分立器件基本电路与应用分析	75
3.1 分立器件电路的一些基本概念	75
3.2 二极管基本应用电路分析	79
3.2.1 二极管电路仿真分析方法	79
3.2.2 二极管电路分析	80
3.2.3 二极管整流电路	84
3.2.4 二极管信号处理电路	89
3.3 三极管基本组态电路分析	90
3.3.1 三极管放大电路基本原理与组态结构	90
3.3.2 共射极交流放大电路	92
3.3.3 共集电极交流放大电路	102
3.3.4 共基极交流放大电路	105
3.3.5 三极管放大电路应用分析	108
3.4 场效应晶体管基本组态电路分析	114
3.4.1 场效应晶体管放大电路基本原理与组态结构	114
3.4.2 共源极电路	116
3.4.3 共漏极电路	121
3.4.4 共栅极电路	124
3.4.5 MOS 管放大电路应用分析	126
3.5 差分放大电路与电流镜电路	129
3.5.1 差分放大电路	129
3.5.2 电流镜电路分析	139
本章小结	142
练习题与习题	142
第4章 集成运算放大器分析	146
4.1 运算放大器的基本结构与分析模型	146
4.1.1 运算放大器基本结构	146
4.1.2 运算放大器基本特征	147
4.1.3 运算放大器电路分析模型	149
4.1.4 运算放大器的基本参数	153
4.1.5 运算放大器的频率响应特性	158
4.1.6 Multisim 中的理想运算放大器	161
4.2 运算放大器基本应用电路组态	164
4.2.1 放大型组态	164

4.2.2 振荡型组态	167
4.3 运算放大器的基本类型	169
4.3.1 通用运算放大器	169
4.3.2 跨导运算放大器 (OTA)	172
4.3.3 仪器运算放大器	172
4.4 运算放大器 Spice 仿真分析模型	172
本章小结	175
练习题与习题	176
第 5 章 电子线路仿真分析	179
5.1 电子线路仿真分析	179
5.1.1 目的与内容	180
5.1.2 基本概念	186
5.2 频率特性与反馈的仿真分析	194
5.2.1 频率特性与频域分析	195
5.2.2 反馈结构与反馈分析的基本概念	200
5.2.3 零点、极点与电路稳定性	209
5.3 电子线路基本分析方法	213
5.3.1 定性分析	213
5.3.2 图解法	215
5.4 行为特性与参数特性的仿真分析	218
5.4.1 分立器件电路行为特性仿真分析	218
5.4.2 运算放大器电路仿真分析	227
本章小结	232
练习题与习题	233
第 6 章 模拟信号处理电路仿真分析	236
6.1 放大器电路	236
6.1.1 放大器电路行为特性分析	236
6.1.2 放大器参数特性分析	242
6.1.3 差分放大电路	249
6.2 振荡器电路	255
6.2.1 振荡器电路基本原理	255
6.2.2 基本振荡电路	256
6.3 模拟信号运算电路	262
6.3.1 加法和减法电路	262
6.3.2 积分和微分电路	268
6.4 滤波电路	275
6.4.1 滤波器的基本概念	275
6.4.2 低通滤波器 LP	276
6.4.3 高通滤波器 HP	279

6.5 模拟信号的变换电路	281
6.5.1 模拟信号变换的基本概念	281
6.5.2 信号调制电路模块	282
6.6 开关电容电路	283
本章小结	286
练习题与习题	287
第7章 功率电路仿真分析	290
7.1 电子线路功率分析基本概念	290
7.1.1 电子线路功率的特性	290
7.1.2 电子线路功率消耗的计算	301
7.2 信号驱动电路	303
7.2.1 模拟信号驱动电路	304
7.2.2 数字信号驱动电路	306
7.3 交流功率放大电路	309
7.3.1 功率放大的基本概念	309
7.3.2 基本交流功率放大电路	312
7.4 直流稳压电源	318
7.4.1 电源电路及其仿真分析的基本概念	318
7.4.2 集成稳压电源电路	319
本章小结	327
练习题与习题	327

第 1 章 绪 论

电子技术是在现代科学技术和社会生活中得到广泛应用的技术,更是电子信息、计算机与信息技术等学科与工程技术学习和研究的重要基础。

在科学研究和工程技术中,由电子元器件连接而成的电路叫做电子电路或电子线路,电子线路一般都具有独立的电路功能。由电子线路组成的、比较复杂并具有独立应用功能的电子电路叫做电子系统。电子技术 (Electronics Technology),是研究电子电路和电子系统分析、设计和应用技术的科学。

电子技术分析方法的基础是电路理论、信号与系统理论和半导体物理理论。随着电子技术和信息化技术的发展,电子技术的应用也日趋信息化和数字化。所谓信息化和数字化,就是采用现代计算机和信息技术对电子线路或系统进行仿真分析和研究。

从信息传输和处理的角度看,任何工程系统都可以被看成是一个信号和信息处理系统,而任何信息处理,都是进行某种数学运算。所以,电子技术的分析可以用仿真工具来完成,仿真分析的基础就是在计算机中的对电子线路或系统的模型进行运算。随着有关电路理论和电子线路模型理论的发展,仿真分析方法已经成为现代电子技术研究、分析的基本工具。由于电子系统的作用可以被看成是信号和信息的处理系统;因此,在利用仿真工具分析电子线路时,首先必须建立起必要的信号处理、物理电学和电路分析等方面的基本概念。这些基本概念是学习电子技术的基础,也是进行电子线路或系统分析和设计的基础。

本书以目前应用广泛的 EDA (电子设计自动化) 软件 Multisim2001 (以下简称 Multisim) 为基本工具,讨论有关电子线路分析和设计的问题。

1.1 电子系统分析基本概念

电子元器件和其他辅助器件按照一定的设计要求连接在一起后,就形成了电子线路。不同的电子线路具有不同的基本功能(例如对输入电压或电流信号进行放大等)。把不同的电子线路按照设计要求组合在一起,就形成了能够完成应用任务的电子系统(例如收音机、电视机、PC 等)。因此,电子技术的基本分析对象是电子元器件组成的电子线路,电子技术的基本分析理论和方法,则来自于电路理论、信号与系统理论和半导体物理学等理论。

1.1.1 电子线路模型的概念

为分析系统,系统理论中把描述系统输入和输出变量之间关系的方程叫做系统动力学方程。动力学方程所描述系统变量的变化规律,叫做系统的行为特性;而影响系统行为特性的某些物理量,叫做系统参数,例如电子线路中电阻的阻值、信号电压的幅值和频率、输入和输出电阻等。为了清楚地认识电子线路,明确地指出电子线路的基本行为特征和重要参数对电路的作用与影响;同时,也是为了能够利用仿真分析方法,必须建立相应的电子线路模型。与电子线路模型有关的基本概念,是电子线路理论分析和仿真分析的基础。

1. 电子线路的物理特征和物理参数

电子线路中的元件是具有单一物理参数特性的物理实体,例如电阻、电容等。器件是用

物理元件通过各种不同加工方法组成的物理单元实体,器件具有相应的电路功能和参数特性,例如各种集成电路器件、开关等。

与电子线路分析有关的物理概念包括电路结构和基本参数如下

(1) 电路结构

电路结构包括了电路中所包含的电子元器件,以及这些元器件之间的物理连接关系。对电子线路结构的描述,就是通常所说的电路图。电路结构代表了电子线路的物理模型,提供了物理特征的基本描述方法,通过对电子线路结构的分析,可以确定电路中各参数的确定方法和分析计算方法,进而建立电子线路的基本分析模型。

(2) 基本参数

基本参数是指用来描述电子元器件特性的独立物理量。对于电子元器件来说,基本物理量就是电流和电压。本质上讲,无论电子线路多复杂,最终分析的结果,都是对所关心的电参数的描述,例如输入信号与输出信号之间的关系,电路中元器件参数对电路性能的影响等。

有了电路结构和基本参数的概念,就可以建立相应的模型概念了。

【例 1.1】MOS 管电压放大器。MOS 管是一种电压控制的电流源,图 1-1 中的 u_{gs} 可以控制 I_d 。

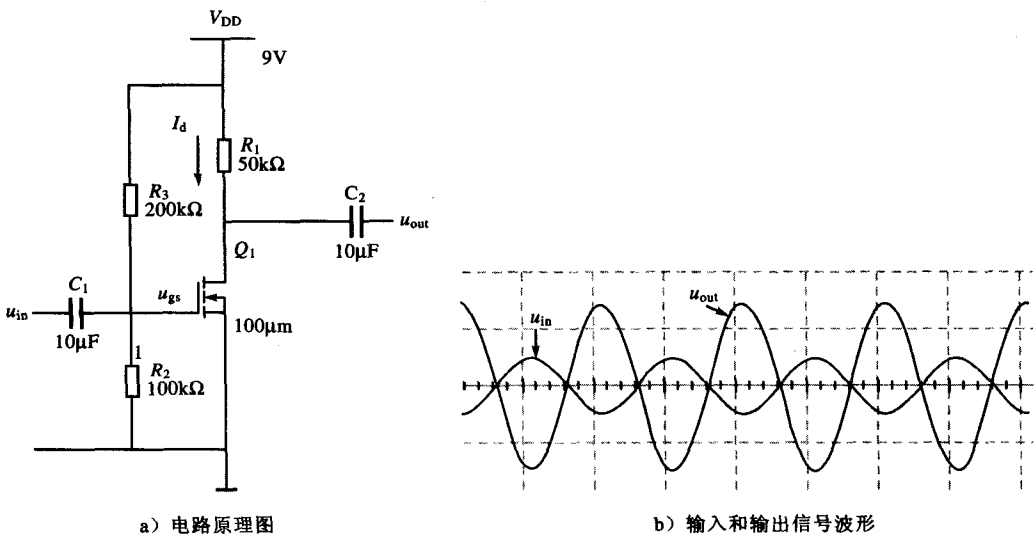


图 1-1 一种 MOS 管交流电压放大器

1) 电路结构

图 1-1a 给出了 MOS 管电压放大器电路的原理结构,可以提供电路所需要的元器件及其相互的连接关系。

2) 电路参数

电路中的电阻值、电容值及 MOS 管的电路参数(相关的内容在第 2 章中讨论)。

3) 功能

图 1-1 是一个用 MOS 管、电阻和电容实现的电压放大器,其功能是把输入的弱信号(电压幅度低)放大(见图 1-1b 所示),使输出的电压幅度满足电路其他部分的或信号处理的要求。之所以能够实现这个功能,是利用了 MOS 管的电压控制电流和欧姆定律,即通过 MOS 管把输入电压转换为输出电流的变化,再通过等效电阻 R_D (见图 1-2)把电流按比例转换为电压。

2. 电子元器件模型的基本概念

对元器件进行分析的目的,就是要建立基本物理量之间的数学关系。例如,从电压放大的角度看,图 1-1 所示电路的输入信号和输出信号之间的关系可以描述为

$$u_{\text{out}} = K u_{\text{in}} \quad (1-1)$$

式中, K 是比例系数,说明了输入电压信号幅度和输出电压信号幅度之间的比例关系。

这种数学关系,就叫做分析模型。与电子线路分析有关的模型包括物理模型、分析模型和仿真模型。

(1) 物理模型——物理特征的电路图描述

电子线路最基本的物理模型,就是电路图。电路图中包括了组成电子线路的元器件,并表明了这些单元之间的连接关系,如图 1-1 所提供的 MOS 管放大器的电路结构图。由物理学可知,这种连接关系的描述,给出了不同元器件之间基本电学变量之间的关系。

必须注意,电路图是经过对实际电路的分析和简化处理后所得到的电子线路物理描述。例如在实际电路中,各元器件之间的连接都是由金属线完成的,对于许多电子线路来说,绘制电路图时往往忽略这些连线的物理参数,而是用几何线段来代替,从而突出了电子线路中的元器件和结构特征。此外,电路图并没有真实反映电路中各元器件的空间位置关系,而只提供了拓扑连接结果。因此,电路图是描述电子线路物理组成的一种物理模型。

需要指出的是,为了简化复杂系统的分析,或降低分析过程的复杂性,电子线路分析中经常使用“等效电路图”的概念。等效电路也是电子线路物理模型的一种,但等效电路描述并不是电子线路实际物理组成,而是根据基本物理电学原理对电子线路的一种抽象描述。等效电路与所描述的电子线路具有相同的物理特性和电路行为特性(电路的功能和性能),这是等效电路的基本性质。利用等效电路的概念,可以把复杂的半导体元器件用相应的电路元件(电阻、电容、电感和电源)来描述,从而使复杂的电磁场问题转变为简单的电路问题。不过必须注意的是,等效电路必须与实际物理电路具有相同的“物理功效”。图 1-2 是仅考虑交流电压放大时图 1-1 的等效电路图。

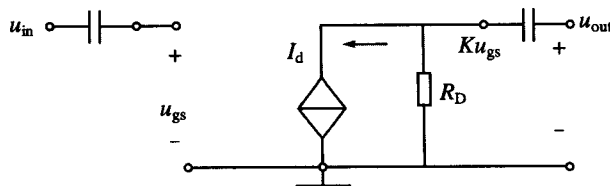


图 1-2 图 1-1 的等效电路

(2) 分析模型——基本特征和参数关系的描述

在电路图的基础上,利用电路分析和信号系统理论,可以进一步建立电子线路分析中所关心的参数变量之间的数学关系。由于这种数学关系比较精确地反映了电子线路中各物理变量及参数之间的相互影响与作用(例如输入信号对输出信号的影响等),所以,这种数学关系模型叫做分析模型。分析模型实际上是电子线路定量分析的结果,是电子线路各种分析的基础,也是仿真分析的基础。

(3) 仿真模型

仿真模型是针对仿真分析方法提出来的电子线路模型概念。由于仿真的基本工具是计算机,所以,仿真模型的任务是提供适合于计算机处理的算法结构和电路描述。仿真模型的基础是物理模型和分析模型,一般情况下,可以直接把物理模型作为仿真模型(例如在 Multisim

中直接对电路图进行仿真)。由于计算机计算能力巨大,所以仿真模型中往往采用比较精确复杂的电路描述方法,例如半导体器件的复杂电路模型等。仿真模型往往涉及到电子元器件的复杂模型,是目前电子技术中的一个重要研究领域。本书仅涉及直接利用物理模型和分析模型的仿真分析方法,有关仿真模型的具体建立方法不属于本书的范围。

通过以上讨论可知,对电子线路理论分析的目的,就是为了找到电子线路中各个电参数(例如电流和电压)之间的关系,也就是建立相应的物理模型和分析模型。

1.1.2 电子线路分析的基本内容

电子线路分析的基本目的是回答如下3方面的问题

- 1) 电路或系统具有什么功能?
- 2) 怎样用电子技术实现一个系统的功能?
- 3) 电路或系统能达到什么样的技术指标?

1. 基本分析概念和方法

在电子技术中,对电子线路的基本描述通常使用时间或频率两个基本物理变量,也就是说,把电子线路中的电压、电流及其他的相关参数看做是时间或频率的函数。因此,电子线路行为特性和参数分析中,包括时间特性分析和频率特性分析两个基本概念和方法。

(1) 时间特性分析

根据电路理论,电子线路的时间特性可以用静态和动态两个特性来描述。

所谓静态特性,是指电路在输入信号或所设置的条件不随时间发生变化时,电路所具有的行为特性,例如当没有信号输入时放大器的行为特性。

所谓动态特性,是指当给定条件随时间发生变化时,系统行为随时间变化的规律。

进行时间特性分析时,电子线路的物理变量电路特性或信号是时间的函数,因此时间特性分析也叫做时域分析,即在时域内进行分析,例如式(1-1)中的输入和输出信号均为时间信号,所以,式(1-1)提供了一个时间域分析表达式。

时间特性分析实际上就是利用物理学中的基本变量时间对电子线路特性进行描述的一种方法。由于电子线路分析中最关心的是电路对信号的作用,因此,静态特性和动态特性,实际上是指电子线路对输入信号或其他条件随时间发生变化时的固有特性。

电子线路的时间特性分析,一般需要借助于微分方程。对任何一个电子线路,都可以用微分方程对其电参量进行描述,根据给定的边界条件和初始条件求解微分方程,就可以得到系统某个电参量(例如输出电压)随时间变化的函数表达式。也就是说,如果给定一个时间值,就可以得到电子线路或系统某个电参量在该时刻的确切数值。

(2) 频率特性分析

根据电路理论,除了可以用时间描述和分析电子线路外,还可以用频率对电子线路进行描述和分析。

频率特性分析时,电路的参考变量是频率,因此也叫做频域分析。电子线路频率特性的分析,往往需要借助于积分变换和代数方程。

电子线路的频率特性,可以用频谱和频带宽度两个参数来描述。

频谱是电子线路与系统的基本频率特征,频谱所反映的是电子线路中信号幅度及相位随频率变化的规律,是电子线路所固有的频率特性。频率特性说明了电子线路对不同频率信号的处理能力与结果。通过频谱分析,可以了解电路的频率特性及其对输入信号的作用。

频带宽度所指出的是电子线路具有的最低和最高频率之差。频带宽度能反映电路或系统对输入信号产生的影响。例如,如果一个电子线路的最低和最高频率分别为0Hz和100kHz,

则该系统的频带宽度为 100kHz。

必须指出,对电子线路的频率分析,所得到的是电路在无限长时间内的特性。理论和工程实际都证明,如果只对一段有限时间内的电路行为进行频率分析,难以得到正确的分析结果。为了简化频率特性分析,科学研究和工程技术中往往假设在无限长的时间内,电子线路的所有限制条件都不会发生变化。

一般认为电子线路的频率特性与时间无关,因此,频率特性实际上是对电路宏观行为特性的描述。

2. 基本分析内容

根据电子线路模型的概念可知,必须用基本参数和模型来解决电子线路分析和设计中的问题。电子线路分析内容可以归纳为如下两个方面

(1) 电子线路行为特性分析

所谓行为特性,是指电子线路模型所代表的功能和技术特性,例如放大器的行为特性包括放大功能、放大能力、频率特性等。在进行理论分析时,行为特性的描述是建立电子线路的分析模型,这时得到的往往是电子线路的数学解析描述。在进行仿真分析时,行为特性的描述是通过对电路图的仿真运算和测试结果总结出特性和指标,这时得到的往往是电子线路中不同参数变量之间的关系曲线。

(2) 电子线路参数分析

所谓电路参数是指描述电路技术特点和特性的数据或变量。电路参数必须具有明显的物理意义。在电子技术中,电路的基本参数包括输入或输出信号的电压、电流、频率、系统时间常数、频率特性,以及电路元器件数据等。

参数分析的目的在于指出电子线路中元器件物理参数和结构参数的具体数值,以及元器件参数对电路行为特性的影响。理论分析中,一般是根据分析模型和电路图,建立相应的参数计算公式。仿真分析中,一般是通过仿真测量和基本分析工具得到相应的曲线或数值,再根据这些具体数值或曲线对相应的参数进行分析说明。

电子线路或系统参数分析的基础是电路模型,参数分析根据电路模型来确定电路参数。电子线路的参数分析一般包括输入参数、输出参数、噪声等。在进行参数分析时,同样也是采用时域分析或频域分析的方法,这是因为电路或系统的时间特性或频率特性都是由器件和电路结构所决定的。通过参数分析可以得到或估计出电子线路的如下一些特性

1) 频率特性:频率特性是指电子线路对不同频率信号的处理结果,直接反映了电子线路或系统中,信号幅度、相位与频率之间的关系,是电子线路或系统最重要的特性之一。

2) 反馈特性:反馈是指电子线路或系统的输出信号通过某种途径进入到系统的输入端,或构成对输入信号的影响,进而影响到电子线路的输出。反馈是一种电路结构,反映了电子线路或系统的输出对系统特性的影响,反馈特性是电子线路或系统的一个基本特性。

3) 稳定性:稳定性是指反映电子线路或系统稳定工作的基本特征。

4) 灵敏度:电子线路是由电子元器件通过连接而构成的,其中电子元器件的参数(例如电阻值、电容值、管子的电流控制参数等)如果发生变化,会对电子线路的行为特性产生影响。在电子线路的设计和分析中,需要确切地掌握元器件参数对电路行为特性影响的原理和数量级,所以,提出了灵敏度的概念,也就是说,灵敏度是针对电路参数提出的,指出了电路元件参数对电子线路行为特性的影响程度。例如,在其他元件参数不变的情况下,如果图 1-1 中 R_1 变化 10% 会引起电路放大倍数变化 1%,而 R_2/R_3 变化 10% 会引起电路放大倍数变化 10%,则说明 R_2/R_3 的具有较高的灵敏度。

5) 输入特性和输出特性:电子线路中的输入特性和输出特性是指输入端电量之间的关

系，以及输出端电量之间的关系。输入特性和输出特性取决于电路或器件的组成与结构。

6) 分布参数特性：当电路在较高频率条件工作时，电路结构（包括电路器件）可能不再满足集总参数的限制条件，就是说器件之间会因为电磁场分布的原因形成信号通道。描述这种通道的电路，叫做分布参数电路，电路中元件的参数叫做分布参数。分布参数是由于电路结构在高频条件下所引起的无源参数 R 、 L 、 C 。

7) 温度特性：温度特性是现代电子线路的重要特性，这是因为半导体器件的特性参数对温度十分敏感。电子线路的温度特性取决于电路器件的结构和电路特性，在电子线路或系统中，温度特性对电路或系统的工作有重要的影响。

8) 噪声特性：噪声是电子线路中元器件的固有特性，同时，对于电子线路来说，噪声也代表了电路器件和结构所引起的干扰。此外，在信号分析中，噪声也是一个十分重要的分析概念，是电子线路设计中必须十分注意的一个基本概念。

9) 电磁兼容特性：电磁兼容是现代电子线路分析和设计中的重要概念。电磁兼容特性代表了电子线路或系统对电磁噪声的抑制能力，包括对外来噪声和自身产生的噪声的抑制。

10) 器件与电路的负载特性：任何一个电子线路在设计和分析中，都必须十分注意不同电路部分之间的相互影响。这种相互影响主要体现在前级电路的输出信号，能否完好无损地进入到后级电路。这就要求电子线路应当具有一定的功率输出能力，也就是负载能力。负载特性就是用来衡量电子线路驱动能力的一个基本概念，是指电子线路驱动负载的能力，反映了电子线路或系统功率输出的能力。注意，电子线路的负载能力具有很强的针对性，不是对任何形式的负载都具有相同的负载特性，所以，在电子线路负载特性的分析中，必须注意驱动负载的性质，如电阻性、电容性或电感性。

1.1.3 电子线路的实验分析方法

电子线路的实验分析方法，可分为电路实验和仿真实验两大类。

电路实验使用实际电路器件组成相应的电路，通过对电路现象的观察（例如对电位和信号等的观察等）来总结电路的模型，或对理论分析结果进行验证。

仿真实验是仿真分析的基本内容，仿真实验利用仿真工具提供的电路描述方法，对电子线路进行仿真运算，并对运算结果进行观察、分析和总结，以便建立电路的分析模型或对已有电路模型进行检查验证。

由于半导体器件制造工艺的分散性及电路、系统分析理论的近似和简化，使得电子线路的实验结果（电路实验和仿真实验）往往与理论设计结果之间存在一定的差距，这个差距有时还相当大。因此，如何通过实验检验设计结果、如何通过实验发现设计缺陷等，是电子技术的基本组成部分。同时，也是仿真分析的重要组成部分。可以说，实验是学习电子技术的重要方法。

1. 电子线路和系统实验的目的

对于电子线路实验来说，无论是使用物理方法还是仿真方法，都是要达到如下目的

(1) 通过实验检验电路设计结果的正确性

电子线路分析中，如果考虑到所有的影响因素，则分析将会变得十分复杂，甚至无法进行。所以，在电子线路分析中，总是对分析对象和分析条件进行简化处理。一个重要的简化处理就是分析中把电路中的元器件看成是理想元器件，并在许多场合认为电子线路是线性时不变的（即电路变量之间满足线性关系、参数不随时间变化）。实际上，电子元器件并非理想元器件，例如电路元件只有在满足一定的约束条件时才可以被看做是线性的。同时，实际中的电路也绝不是能简单地用线性和不随时间变化的特点来描述。因此，电子线路的设计分析

结果与实际电路情况是否符合,必须由实验来检验。

(2) 通过实验对电路进行调试

电子系统的设计,实际上包含调试工作在内。也就是说,只有达到设计要求和调试结果相一致,才能说完成了电子线路系统的设计。因此,电路调试技术对于电子技术来说是十分重要的部分。调试过程,实际上是根据测试结果,对电子线路或系统参数进行调整的过程,所以电路调试需要建立在熟知电路设计要求和设计分析结果基础之上,否则就无法完成调试工作,甚至不知道要调试什么。必须指出,由于仿真分析中采用了大量的简化和近似处理,其实验结果与实际电路之间会存在一定的差距,因此,电路调试的最终结果必须以电路实验为准。不过本书仅涉及到基本的电子线路分析问题,并且电路的约束条件与实际情况十分接近,因此,本书例题的仿真结果与实际电路实验结果之间的误差并不大。

(3) 通过实验的手段研究电路特性

实际上,有些工程实际问题还可以直接利用实验的方法加以解决。通过实验研究电路的基本特性,是工程实际中研究问题的基本方法之一,这样可以直接把实验结果作为研究问题的出发点。在用实验手段研究电子线路时,仿真方法具有很大的优势。仿真实验可以采用图形方式把电路输入计算机,也可以采用编程的方法把电路输入计算机,而不需要制作真实的电路,这就节省了大量的时间。不过需要注意,仿真实验是以物理或数学模型为基础的,所以,只有在模型正确的前提下,仿真结果才是正确的。同时,还应当十分注意仿真工具对电路结果、参数和测量方法的限制。

2. 电子线路实验的基本内容

(1) 建立并分析实际电路

在进行实验前,必须用已经建立好的实际电路得到相应的分析结果,作为实验结果分析的指导。同时,通过实验还可以纠正原有设计的缺陷。另外,利用电路与系统理论,通过实验建立已知电路的物理模型和分析模型。

(2) 选择实验手段

无论是电路实验还是仿真实验,实验手段是保证实验能够顺利进行并得到正确结果的基础。实验手段中包括实验方案、实验进程(实验路线)和观测方法。设计合理的实验方案、选择正确的实验进程(实验路线),以及正确选择实验中所需要的观测仪器,是电子线路实验成功的基本保证。此外,实验手段还与实验条件有直接的关系,不同的实验条件应当有不同的实验手段。

3. 基本实验技术

无论是物理实验还是仿真实验,都需要如下基本技术

(1) 仪器的使用操作技术

正确地使用仪器,熟练地操作仪器,是完成电子线路和系统实验的基础,也是正确选择仪器的基础。不能正确使用操作仪器的直接后果,就是得不到正确的实验观察结果,而没有正确的实验观察结果,就不能对电路的行为做出正确的判断。应当注意,仿真工具中提供的测量分析方法及测试仪器,与电路实验中所使用的电子仪器在操作上有所差别。

(2) 基本测试目标和观察结果的基本物理和数学概念

在进行电子线路实验前,必须要确定基本测试目标,并对符合设计要求的测量结果有正确的预测。测试目标的确定和观测结果的预测,其基础是对实验电路基本物理和数学概念的掌握。也就是说,电子线路或系统进行实验前,必须做到对电路的基本状态有正确的理解和预测。

(3) 分析实验结果并提出真实数据和改进指导

当通过实验得到测量数据后(所观察到的各种结果),重要的技术就是如何对这些数据进

行分析处理。正确的数据分析处理是得到正确结论的保证,而对数据进行正确分析处理的基础和基本出发点,就是实验电路或系统的正确认识。换句话说就是,正确分析测试和实验结果的技术基础,是对电子线路或系统的设计条件、实际工作条件及设计结果的全面而正确的认识。

1.2 电子线路的信号特征

信号是电子线路分析的一个基本对象,信号中载有描述电路的各种信息。

在应用中,电子线路的基本任务就是对信号进行相应的处理。因此,信号的特征对电子线路分析有着重要作用。

为了有利于对电子线路分析问题进行讨论,本节将简单介绍一些有关信号的基本概念。

1.2.1 信号分类

为了便于描述,工程中对信号进行了不同的分类和定义。在电子线路中,把载有信息的物理电学量(电压或电流)叫做信号。从电子技术的角度看,信号可以分为模拟信号和数字信号两大类。

1. 模拟信号 (Analog signal)

模拟信号是指以模拟量表示的信号,例如电压信号和电流信号。模拟信号又可分成连续时间信号和离散时间信号。连续时间信号对时间变量来说是连续的(例如语音信号、生物信号等),而离散时间信号对时间变量来说是不连续的,但其值仍然是以电压或电流表示的模拟量(不是直接以数字形式表示的)。离散时间信号是一个特殊的模拟信号,其在时间或空间上由离散点上的信号值组成,各点值是模拟量,如图 1-3 所示。

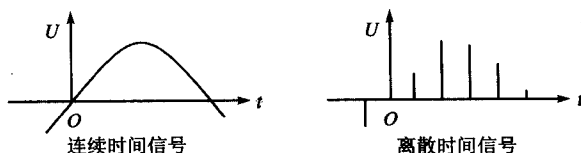


图 1-3 模拟信号

2. 数字信号 (Digital signal)

电子线路中,用数字序列描述的信号叫做数字信号。数字信号是一串数字序列,其中每一个数字都表示信号在某一时刻的数值。



图 1-4 电子技术中的数字信号

电子技术中,把只在两个电压或电流点上变化的信号叫做数字逻辑信号,有时也简称为数字信号(针对电路功能)。由于数字电子线路中使用二进制表示数字,因此,数字电子线路中的数字信号,是指只有两个电平值的信号(电平是数字电路中对电压幅度的另一种称呼),如图 1-4 所示。由于电子技术中的数字信号只有两个电平值,因此也叫做逻辑信号或开关信号,信号的电平也叫做逻辑电平。

本书只讨论与模拟信号处理有关的电子线路,不讨论数字信号的处理问题。