

# 电工电子技术与EDA基础 (上)

Electrical Engineering  
and EDA Fundamentals

Volume I

段玉生 王艳丹 何丽静 主编  
Duan Yusheng Wang Yandan He Lijing

杨福生 主审  
Yang Fusheng



清华大学出版社



Springer

# 电工电子技术 与 EDA 基础 (上)

Electrical Engineering  
and EDA Fundamentals      Volume I

编者 段玉生 (清华大学电机系)  
王艳丹 (清华大学电机系)  
何丽静 (清华大学电机系)  
侯世英 (重庆大学电气工程学院)  
许怡生 (北京工业大学电控学院)  
李钊年 (青海大学水电系)

主审 杨福生 (清华大学电机系)



清华大学出版社  
北京



Springer

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

#### 图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术与EDA基础(上)/段玉生,王艳丹,何丽静等编著. —北京:清华大学出版社,2004

ISBN 7-302-07818-1

I. 电… II. ①段… ②王… ③何… III. ①电工电子—高等学校—教材 ②电子电路—电路设计: 计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①TM1 ②TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第117306号

出版者:清华大学出版社 地址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:王一玲

版式设计:刘祎森

印刷者:北京四季青印刷厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:25 字数:497千字

版 次:2004年5月第1版 2004年5月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-07818-1/TM·47

印 数:1~3000

定 价:29.80元(附光盘1张)

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

# 前 言

“电工电子技术”(电工学)是高等学校理工科非电类专业本科学生的技术基础课。从我国高等学校开设电工学课程以来,随着新技术和新器件的出现,课程内容进行了多次改革,例如 70 年代末引入了模拟和数字集成电路,90 年代初引入了可编程控制器等。进入 21 世纪后,电子设计自动化 EDA(Electronics Design Automation)技术在我国逐渐得到推广应用。它以计算机为工作平台,以硬件描述语言为电路和器件设计的基础,结合相应的 EDA 开发软件,使电子系统的设计产生了质的飞跃,系统的功能验证日趋完善,硬件实现的速度大大提高。当前飞速发展的科技形势对科技工作者提出了新的要求及挑战,掌握和应用 EDA 技术,已经成为每位工程技术人员需要具备的一种技能。为了适应科技发展与教学改革的需要,将 EDA 技术引入“电工学”教学已成当务之急。

本套教材分为上、下两册:上册的主要内容为电工技术与相关的 EDA 知识;下册的主要内容为电子技术与相关的 EDA 知识。两册可以配套使用,也可以单独选用。

本教材根据课程的性质和实际应用情况,对传统的教学内容进行了精选及补充。上册内容包括电路的基本理论和分析方法、EDA 基础知识(SPICE)、磁路与变压器、电动机的原理及应用、继电器-接触器控制和可编程控制器(PLC)等内容;下册内容包括模拟电子电路、数字电子电路、电路的设计与仿真、VHDL 语言、可编程器件等内容。各章都对所选用的教学内容进行了深入细致的分析,努力做到概念准确、重点突出、叙述精练、通俗易懂,便于读者自学。书中配有较多的例题及习题,通过这些练习,读者会加深对课程内容的理解。

电工学课程的发展趋势必然是软硬结合,据此我们在教学内容中加入了 EDA 技术,并将其放在了较重要的位置。有关 EDA 技术部

分,在电工技术和模拟电路中,以电路仿真程序 SPICE 语言为重点;在数字电路中,以硬件描述语言 VHDL 为重点。SPICE 和 VHDL 是目前 EDA 技术中最基础的标准语言,在元件建模、电路的分析仿真等方面具有其他语言无法替代的作用。本册在对电路的基本概念和分析方法做了介绍之后,从第 2 章开始便引入了 SPICE 基本知识,并在以后各章根据其具体内容,对 SPICE 的语法结构、语句格式以及电路仿真过程等做了进一步介绍。也就是说,采用“结合使用,循序渐进”的方法,将 EDA 内容引入到教材中,这样安排既可以避免冗长繁琐的讲解,又可将其与传统的教学内容有机地结合起来,更便于读者学习。在以往的教学过程中,我们按此思路已进行过数次试验,得到了学生的一致好评。

教学内容和学时是有限的,很多需要学习的内容不可能全部安排在课堂上进行讲授,有些内容可以选学或课外自学。我们把不少相关内容放在附录中,将一些常用的应用软件(学生版或演示版)放到光盘中,为学生提供了更大的学习空间。如本册的光盘中,附有电路仿真软件 Multisim 的评估版,并在书后的附录中对该软件的使用作了说明。Multisim 功能强大,具有模拟/数字/VHDL/Verilog 混合仿真能力,而且界面友好、易学易用。Multisim 是以 SPICE 为内核的电路仿真软件,学好 SPICE 对 Multisim 软件的应用(特别是高级应用)将会有很大的帮助,读者掌握了 SPICE 内容后可以自己练习使用 Multisim 进行电路分析。

可编程控制器(PLC)现在已是电工技术教学中不可或缺的内容。根据近几年我国 PLC 的使用情况,西门子公司生产的可编程控制器占有较大市场,而且其系统性能、网络特性等都不错。因此,本册在讲授可编程控制器时,采用了西门子的产品为介绍对象。因为不同的 PLC 产品,在编程语言和使用方法等方面多有类似之处,所以熟悉和掌握西门子的 PLC 产品,也有利于对其他品牌产品的学习和使用。

本套教材的教学内容,主要适用于多学时类型的电工学课程,其他相关类型课程也可选用。各位老师在选择该教材时,可不受学时数的限制,根据本校的实际情况,对教学内容进行安排或取舍。

本书的编写以清华大学的几位老师为主,同时还有北京工业大学、重庆大学、青海大学等高校的有丰富教学经验的老师参加。书中内容凝聚了清华大学电工学及应用电子学教研组很多老师的心血,在

这里向所有为本书做出贡献的老师、同行表示深深的谢意!

本册共分 10 章,第 1,6 章由何丽静编写,第 2,5 章由段玉生编写,第 3,4,9 章由王艳丹编写,第 7 章由李钊年编写,第 8 章由许怡生编写,第 10 章和附录 D 由侯世英编写。全书内容编排以及目录、附录(除附录 D)、附带光盘的内容、SPICE 软件的使用等全部由段玉生负责。本书的统稿工作由段玉生、王艳丹、何丽静共同完成。本书的主审是杨福生教授,他对本书进行了认真审查,严格把关,对本教材的成稿起了关键作用。

由于时间仓促,编者的知识水平有限,书中难免存在不妥和错误之处,真诚希望广大读者特别是从事“电工电子技术”教学的同仁批评、指正!

编 者

2004 年 3 月于清华大学

# 目 录

<b>第 1 章 电路的基本概念和分析方法</b> .....	1
1.1 电路中的物理量及其正方向 .....	2
1.1.1 电路中物理量的实际方向 .....	2
1.1.2 电路分析中的假设正方向 .....	3
1.1.3 电功率 .....	4
1.2 电路元件 .....	5
1.2.1 无源元件 .....	5
1.2.2 有源元件 .....	8
1.3 电路的基本定律 .....	14
1.3.1 欧姆定律 .....	14
1.3.2 克希荷夫定律 .....	15
1.4 电路的两种基本分析方法 .....	17
1.4.1 支路电流法 .....	18
1.4.2 节点电位法 .....	20
1.5 线性电路中的两个重要定理 .....	23
1.5.1 叠加定理 .....	23
1.5.2 等效电源定理 .....	25
1.6 受控源电路及分析 .....	34
1.6.1 受控源的概念 .....	34
1.6.2 受控源的类型及符号 .....	34
1.6.3 含受控源电路的分析 .....	35
本章小结 .....	39
习题 .....	40

<b>第 2 章 电路仿真程序 SPICE 入门</b> .....	46
2.1 SPICE 简介 .....	46
2.2 SPICE 电路文件 .....	48
2.2.1 在 SPICE 中怎样描述电路 .....	48
2.2.2 元件值的写法 .....	49
2.2.3 电路文件的编辑与运行 .....	50
2.3 元件语句 .....	50
2.3.1 电阻、电容和电感 .....	50
2.3.2 电源 .....	50
2.4 直流分析语句 .....	52
2.5 输出语句 .....	54
2.6 子电路的定义和调用 .....	54
2.7 .model 语句与二极管、开关在 SPICE 中的表示法 .....	55
2.7.1 .model 语句 .....	55
2.7.2 开关模型 .....	56
2.7.3 二极管模型 .....	57
2.8 用 SPICE 分析直流电路举例 .....	58
本章小结 .....	61
习题 .....	61
<b>第 3 章 正弦交流电路</b> .....	64
3.1 概述 .....	64
3.2 正弦量的数学描述 .....	65
3.2.1 正弦量的三要素 .....	65
3.2.2 同频率正弦量作加减运算的特点 .....	68
3.2.3 正弦量的相量表示法 .....	69
3.3 单一参数的正弦交流电路 .....	72
3.3.1 纯电阻电路 .....	72
3.3.2 纯电感电路 .....	74
3.3.3 纯电容电路 .....	76
3.4 RLC 串联电路 .....	79
3.4.1 RLC 串联电路中电压和电流的关系及阻抗 .....	79
3.4.2 RLC 串联电路中的功率 .....	81



3.5	交流电路的分析方法 .....	83
3.5.1	阻抗的串并联 .....	83
3.5.2	一般交流电路的分析方法 .....	86
3.5.3	功率因数的提高 .....	89
3.6	谐振现象与交流频率特性 .....	92
3.6.1	串联谐振和并联谐振 .....	92
3.6.2	电路的频率特性 .....	99
3.7	SPICE 在正弦交流电路分析中的应用 .....	106
3.7.1	SPICE 中正弦交流电源的表示方法 .....	106
3.7.2	电阻、电感、电容在 SPICE 中的表示方法 .....	107
3.7.3	SPICE 中的弛豫分析语句 .tran .....	108
3.7.4	交流分析语句 .ac .....	109
	本章小结 .....	113
	习题 .....	113
<b>第 4 章</b>	<b>三相交流电路</b> .....	<b>119</b>
4.1	三相交流电源 .....	119
4.1.1	三相电动势的产生 .....	119
4.1.2	三相交流电源的连接 .....	120
4.2	三相负载及三相电路的分析 .....	122
4.2.1	负载星形连接及分析 .....	123
4.2.2	负载三角形连接及分析 .....	126
4.3	三相电路的功率 .....	127
4.3.1	三相电路功率的计算 .....	127
4.3.2	三相电路功率的测量 .....	128
4.4	三相电路的相序 .....	130
4.5	用 SPICE 分析三相交流电路 .....	131
	本章小结 .....	133
	习题 .....	133
<b>第 5 章</b>	<b>非正弦周期交流电路</b> .....	<b>137</b>
5.1	概述 .....	137
5.2	非正弦周期交流信号的分解 .....	138

5.3	非正弦周期交流电路的计算 .....	141
5.4	有效值和平均功率的计算 .....	143
5.4.1	有效值 .....	143
5.4.2	平均功率 .....	144
5.5	脉冲信号源在 SPICE 中的表示法与傅里叶分析(. Fourier)语句 .....	145
5.5.1	脉冲信号源在 SPICE 中的表示法 .....	145
5.5.2	SPICE 中的非线性受控源 .....	146
5.5.3	SPICE 的傅里叶分析(. Fourier)语句 .....	146
5.6	用 SPICE 分析非正弦电路举例 .....	147
	本章小结 .....	150
	习题 .....	150
<b>第 6 章</b>	<b>电路的过渡过程 .....</b>	<b>154</b>
6.1	概述 .....	154
6.2	换路定理及起始值的确定 .....	155
6.2.1	换路定理 .....	155
6.2.2	起始值的确定 .....	156
6.3	一阶电路过渡过程的分析方法 .....	158
6.3.1	经典法 .....	159
6.3.2	三要素法 .....	162
6.3.3	用叠加法求一阶电路的响应 .....	169
6.4	脉冲激励下的 RC 电路 .....	171
6.4.1	微分电路 .....	171
6.4.2	积分电路 .....	172
6.4.3	序列脉冲作用下的 RC 电路 .....	173
6.5	含有多个储能元件的一阶电路 .....	175
6.5.1	多个储能元件可等效为一个储能元件的一阶电路 .....	175
6.5.2	起始值不独立的一阶电路 .....	175
6.5.3	实用电路举例——脉冲分压电路 .....	178
6.6	二阶电路过渡过程简介 .....	181
6.6.1	RLC 电路二阶过渡过程求解的简要说明 .....	182
6.6.2	二阶过渡过程的特点 .....	183
6.7	用 SPICE 分析电路的过渡过程举例 .....	184

本章小结 .....	186
习题 .....	187
<b>第 7 章 磁路与变压器 .....</b>	<b>191</b>
7.1 磁路 .....	191
7.1.1 磁场的基本物理量 .....	191
7.1.2 磁性材料的特点 .....	193
7.1.3 磁路计算的基本定律 .....	194
7.1.4 磁路的分析和计算方法 .....	196
7.2 变压器的工作原理与应用 .....	199
7.2.1 变压器的分类 .....	199
7.2.2 互感与互感系数 .....	200
7.2.3 变压器的工作原理 .....	202
7.2.4 变压器的运行特性 .....	204
7.2.5 变压器的使用 .....	205
7.3 专用变压器 .....	207
7.3.1 自耦变压器 .....	207
7.3.2 仪用互感器 .....	208
7.4 互感器和理想变压器在 SPICE 中的表示方法 .....	209
7.4.1 互感器在 SPICE 中的表示方法 .....	209
7.4.2 理想变压器在 SPICE 中的表示方法 .....	209
7.5 用 SPICE 分析变压器电路举例 .....	210
本章小结 .....	213
习题 .....	213
<b>第 8 章 电动机 .....</b>	<b>217</b>
8.1 三相异步电动机 .....	217
8.1.1 三相异步电动机的结构及转动原理 .....	217
8.1.2 三相异步电动机的等效电路 .....	223
8.1.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性 .....	225
8.1.4 三相异步电动机的铭牌数据及应用 .....	229
8.2 单相异步电动机 .....	235
8.2.1 单相异步电动机的结构和工作原理 .....	235

8.2.2	单相异步电动机的启动 .....	237
8.2.3	三相异步电动机的单相运行 .....	238
8.3	直流电动机 .....	239
8.3.1	直流电动机的主要结构 .....	239
8.3.2	直流电动机的工作原理 .....	240
8.3.3	机械特性 .....	241
8.3.4	直流电动机的调速 .....	243
8.3.5	直流电动机的使用 .....	245
8.3.6	直流电动机的额定值 .....	247
8.4	控制电动机 .....	247
8.4.1	步进电动机 .....	247
8.4.2	伺服电动机 .....	250
	本章小结 .....	252
	习题 .....	252
<b>第 9 章</b>	<b>继电器-接触器控制 .....</b>	<b>254</b>
9.1	常用低压电器 .....	254
9.1.1	手动电器 .....	254
9.1.2	自动控制电器 .....	255
9.2	基本控制环节 .....	259
9.2.1	直接启动停车控制 .....	259
9.2.2	电动机正反转控制 .....	261
9.2.3	行程开关和行程控制 .....	262
9.2.4	时间继电器和延时控制 .....	263
9.3	控制电路综合举例 .....	265
	本章小结 .....	269
	习题 .....	270
<b>第 10 章</b>	<b>可编程控制器 .....</b>	<b>273</b>
10.1	概述 .....	273
10.1.1	可编程控制器的产生及发展 .....	273
10.1.2	可编程控制器的组成与工作原理 .....	274
10.1.3	西门子 S7-200 可编程控制器简介 .....	280

## 目 录

10.2	S7-200 PLC 程序设计基础 .....	281
10.2.1	可编程控制器的编程语言与程序结构 .....	281
10.2.2	S7-200 PLC 存储器的数据类型与寻址方式 .....	285
10.3	S7-200 PLC 的基本指令(SIMATIC 指令) .....	290
10.3.1	位逻辑指令 .....	290
10.3.2	定时器指令 .....	295
10.3.3	计数器指令 .....	298
10.4	数字量小型 PLC 控制系统程序设计举例 .....	299
10.4.1	PLC 控制系统设计的一般步骤 .....	299
10.4.2	梯形图的经验设计方法 .....	300
10.4.3	PLC 顺序功能图的设计方法简介 .....	307
	本章小结 .....	307
	习题 .....	308
附录 A	AIM-SPICE 的使用方法 .....	310
附录 B	混合电路仿真软件 SPICE OPUS 使用说明 .....	321
附录 C	Multisim V7 使用说明 .....	326
附录 D	STEP 7-Micro/WIN32 编程软件使用指南 .....	337
附录 E	用电安全技术知识 .....	352
附录 F	本书用到的 SPICE3F5 语句 .....	357
附录 G	常用电工电子术语中英文对照表 .....	365
参考文献	.....	377

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Fundamental Conceptions and Basic Methods of Circuit Analysis</b>	<b>1</b>
1.1	Circuit Quantities and Polarities	2
1.1.1	Real Directions of Circuit Variables	2
1.1.2	Reference Directions	3
1.1.3	Electric Power	4
1.2	Circuit Elements	5
1.2.1	Passive Elements	5
1.2.2	Active Elements	8
1.3	Basic Laws in Circuit	14
1.3.1	Ohm's Law	14
1.3.2	Kirchhoff's Laws	15
1.4	Basic Methods of Circuit Analysis	17
1.4.1	Branch Current Method	18
1.4.2	Node Voltage Method	20
1.5	Circuit Theorems	23
1.5.1	Superposition Principle	23
1.5.2	Thevenin's Theorem and Norton's Theorem	25
1.6	Circuits Containing Dependent Sources	34
1.6.1	Concept of Dependent Sources	34
1.6.2	Dependent Sources and Their Symbols	34
1.6.3	Analysis Methods of Circuits Containing Dependent Sources	35
	Summery	39
	Problems	40

<b>Chapter 2 SPICE Fundamentals .....</b>	<b>46</b>
2.1 SPICE Introduction .....	46
2.2 SPICE Circuit File .....	48
2.2.1 How to Describe a Circuit in SPICE .....	48
2.2.2 Component Value in SPICE .....	49
2.2.3 Edit and Run Circuit Files .....	50
2.3 Element Statements .....	50
2.3.1 Resistors, Capacitors and Inductors .....	50
2.3.2 Sources .....	50
2.4 DC Analysis Statements .....	52
2.5 Output Statements .....	54
2.6 Sub-circuits .....	54
2.7 .model Statement , Diode and Switch .....	55
2.7.1 .model Statement .....	55
2.7.2 Switch Models .....	56
2.7.3 Diode Model .....	57
2.8 Examples .....	58
Summery .....	61
Problems .....	61
<b>Chapter 3 Sinusoidal Steady-State Circuit Analysis .....</b>	<b>64</b>
3.1 Introduction .....	64
3.2 Mathematical Description of a Sinusoidal Quantity .....	65
3.2.1 Three Factors of Sinusoidal Quantities .....	65
3.2.2 Addition-Subtraction Operations of Sinusoidal Quantities with a Same Frequency .....	68
3.2.3 Phasor .....	69
3.3 Simple Sinusoidal Circuits .....	72
3.3.1 Resistor Circuit .....	72
3.3.2 Inductor Circuit .....	74
3.3.3 Capacitor Circuit .....	76
3.4 RLC Series Circuit .....	79
3.4.1 The Relation of Voltage and Current and Impedance .....	79

3.4.2	Electric Power in <i>RLC</i> Series Circuit .....	81
3.5	Analysis Methods of Sinusoidal Circuit .....	83
3.5.1	Series and Parallel Impedances .....	83
3.5.2	Analysis Methods .....	86
3.5.3	Power Factor Correcting .....	89
3.6	Resonance and Frequency Response .....	92
3.6.1	Series Resonance and Parallel Resonance .....	92
3.6.2	Frequency Response .....	99
3.7	Sinusoidal Steady-State Circuit Simulation Using SPICE .....	106
3.7.1	Sinusoidal Source in SPICE .....	106
3.7.2	Resistor, Inductor, Capacitor in SPICE .....	107
3.7.3	.tran Statement .....	108
3.7.4	.ac Statement .....	109
Summery	.....	113
Problems	.....	113
<b>Chapter 4</b>	<b>Three-Phase Circuit .....</b>	<b>119</b>
4.1	Three-Phase Voltages .....	119
4.1.1	Generation of Three-Phase Electromotive Force .....	119
4.1.2	Connection of Three-Phase Voltages .....	120
4.2	Three-Phase Load .....	122
4.2.1	Wye-Connection Load .....	123
4.2.2	Delta-Connection Load .....	126
4.3	Three-Phase Power .....	127
4.3.1	Computational Method .....	127
4.3.2	Measurement of Three-Phase Power .....	128
4.4	Phase-Sequence .....	130
4.5	SPICE Example .....	131
Summery	.....	133
Problems	.....	133
<b>Chapter 5</b>	<b>Nonsinusoidal Periodic Current Circuits .....</b>	<b>137</b>
5.1	Introduction .....	137



5.2	The Fourier Series .....	138
5.3	Circuit Analysis of Nonsinusoidal Periodic Current Circuit .....	141
5.4	Effective Value and Averaging Power .....	143
5.4.1	Effective Value .....	143
5.4.2	Averaging Power .....	144
5.5	Pulse Source in SPICE and Fourier Analysis Statement (. Fourier) .....	145
5.5.1	Pulse Source Description in SPICE .....	145
5.5.2	Non-linear Dependent Sources .....	146
5.5.3	Fourier Analysis Statement (. Fourier) .....	146
5.6	SPICE Examples .....	147
	Summery .....	150
	Problems .....	150
<b>Chapter 6 Transient Analysis .....</b>		<b>154</b>
6.1	Introduction .....	154
6.2	Initial Conditions of Switched Circuits .....	155
6.2.1	Switching Theorems .....	155
6.2.2	Calculating the Initial Conditions .....	156
6.3	First Order Circuits .....	158
6.3.1	Classical Method .....	159
6.3.2	Three-Factor Method .....	162
6.3.3	Response Analysis of a First Order Circuit with Superposition Method .....	169
6.4	The Response of a RC Circuit to a Pulse Input .....	171
6.4.1	The Differential Circuit .....	171
6.4.2	The Integral Circuit .....	172
6.4.3	The Response of a RC Circuit to a Sequential Pulse Input .....	173
6.5	First Order Circuit Containing Several Storage Elements .....	175
6.5.1	First Order Circuit Containing Series and Parallel Storage Elements .....	175
6.5.2	Complex First-Order Circuit .....	175
6.5.3	Pulse Voltage Divider .....	178
6.6	Introduction to Second Order Circuits .....	181