

EDA 工程技术丛书

Altium大中华区总经理David Read作序

邓中亮

北京邮电大学教授

谢凤英

北京航空航天大学教授

马熙飞

Altium公司大学计划经理

孟松

Keysight EDA大中华区总经理

联袂推荐

Circuit Design,  
Simulation and PCB Design  
from Analog, Digital, RF,  
CPU to Signal Integrity

崔岩松 编著

# 电路设计、仿真与PCB设计

从模拟电路、数字电路、射频电路、控制  
电路到信号完整性分析

清华大学出版社

# 电路设计、仿真与PCB设计

从模拟电路、数字电路、射频电路、控制  
电路到信号完整性分析

**Circuit Design,  
Simulation and PCB Design**  
from Analog, Digital, RF,  
CPU to Signal Integrity

崔岩松◎编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统论述了电路的原理图设计、电路仿真、印制电路板设计与信号完整性分析,涵盖了模拟电路、数字电路、射频电路、控制电路等。全书主要包括三部分:第1部分(第2~6章)介绍电路设计与仿真,在介绍了常用的电路仿真软件的基础上,详细讲解了 Altium Designer 模拟电路仿真、ADS 射频电路仿真、ModelSim 数字电路仿真、Proteus 单片机电路仿真,举例说明了基本单元电路的设计与仿真方法;第2部分(第7~9章)以 Altium Designer 18.0 为设计工具,介绍了电路原理图和 PCB 设计流程、原则、方法和注意事项;第3部分(第10、11章)介绍了电路中的信号完整性规则及仿真方法。

本书以培养读者具备一般电路设计、仿真和 PCB 设计的能力为宗旨,可作为高等院校电子类专业“EDA 技术”课程的教材,也可作为“电路分析”“模拟电路”“数字电路”等理论课程或相关实验课程的辅助教材,还可作为相关工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

电路设计、仿真与 PCB 设计:从模拟电路、数字电路、射频电路、控制电路到信号完整性分析/崔岩松编著. —北京:清华大学出版社,2019

(EDA 工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-52512-7

I. ①电… II. ①崔… III. ①电路设计 ②电子电路—计算机仿真—应用软件 IV. ①TM02 ②TN702.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 043256 号

责任编辑:盛东亮 钟志芳

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:33.75 插 页:1 字 数:817千字

版 次:2019年9月第1版

印 次:2019年9月第1次印刷

定 价:99.00元

产品编号:079381-01

## 作者简介

### 崔岩松

北京邮电大学电子工程学院副教授，国家级电子信息实验教学中心教学团队。长期从事电子电路设计与EDA技术、多媒体通信与集成电路领域的教学和研究工作。先后开设“电路仿真与PCB设计”“模拟集成电路设计”“三维集成电路设计”等多门本科生及研究生课程。曾获国家科学技术进步奖二等奖、中国通信学会科学技术奖一等奖、中国电子学会电子信息科学技术奖一等奖、北京市教学成果二等奖、北京市科技进步奖三等奖，并获得北京市大学生电子设计竞赛优秀辅导教师、全国高等学校创新创业教育工作突出者、大学生创新创业实践教学先进工作者等荣誉称号。已获授权国家发明专利5项，出版教材3部。

## 本书涉及的主题

- 常用的电子电路设计与仿真工具介绍
- 电子电路SPICE仿真描述与模型创建
- 基于Altium Designer 18.0的电子电路设计与仿真
- 基于ADS 2017的射频电路设计与仿真
- 基于ModelSim 10.5的数字电路设计与仿真
- 基于Proteus VSM的控制电路设计与仿真
- 常用电子元器件特性及封装
- 印制电路板基础知识及材质、生产加工流程
- 元器件的原理图符号和PCB封装制作
- 电路原理图绘制、仿真及检查
- PCB布局布线设计规则及相关参数设置
- 电路信号完整性和电源信号完整性设计及仿真

## 本书的突出特点

- 介绍了电子设计自动化技术在模拟电路、数字电路、射频电路、单片机电路的应用
- 通过实际电路案例讲解各仿真工具的使用
- 详细描述原理图和PCB的设计规则与设计步骤
- 针对高速电路设计的信号完整性和电源完整性进行系统的讲解和仿真

Altium 公司一直致力于为每个电子设计工程师提供最好的设计技术和解决方案。三十多年来,我们一直将其作为 Altium 公司的核心使命。

这期间,我们看到了电子设计行业的巨大变化。虽然设计在本质上变得越来越复杂,但获得设计和生产复杂 PCB 的能力已经变得越来越容易。

中国正在从世界电子制造强国向电子设计强国转型,拥有巨大的市场潜力。专注于创新,提升设计能力和有效性,中国将有机会使这种潜力变为现实。Altium 公司看到这样的转变,一直在中国的电子设计行业投入巨资。

我很高兴这本书将出版。学习我们的设计系统是非常实用和有效的,将使任何电子设计工程师在职业生涯中受益。

Altium 公司新的一体化设计方式取代了原来的设计工具,让创新设计变得更为容易,并可以避免高成本的设计流程、错误和产品的延迟。随着互联设备和物联网的兴起,成功、快速地将设计推向市场是每个公司成功的必由之路。

希望您在使用 Altium Designer 的过程中,将设计应用到现实生活中,并祝愿您事业有成。

Altium 大中华区总经理 David Read



2019 年 6 月

## FOREWORD

At Altium we always have been passionate about putting the best available design technology into the hands of every electronics designer and engineer. We have made it our core mission at Altium for more than 30 years.

Over this time we have seen much change in the electronics design industry. While designs have become more and more complex in their nature, the ability to design and produce a complex PCB has become more and more accessible.

China has a great opportunity ahead, to move from being the world's electronics manufacturing power house, to become the world's electronics design power house. That opportunity will come from a focus on innovation and raising the power and effectiveness of the electronics designer. Seeing this transformation take place, Altium has been investing heavily in the design industry in China.

To that end, I am delighted to see this book. It is an extremely practical and useful approach to learning our design system that will surely benefit any electronics designer's career.

Our approach to unified design approach replaces the previous ad-hoc collection of design tools, making it easier to innovate and allows you to avoid being bogged down in costly processes, mistakes or delays. With the rise of connected devices and IoT bringing designs to market successfully and quickly is imperative of every successful company.

I wish you the best of success in using Altium Designer to bring your designs to life and advance your career.

General Manager, China





随着计算机技术的发展,电子设计自动化技术(EDA)获得了飞速的发展,在其推动下,现代电子产品几乎渗透到社会的各个领域,有力地促进了社会生产力的发展和社会信息化程度的提高,同时也使现代电子产品性能进一步提高,产品更新换代的节奏也变得越来越快。

电子设计自动化技术的核心是电子电路、IC 或系统设计及仿真、电子系统的制造及仿真。作者在多年从事电子电路设计及开发和讲授“电路仿真与 PCB 设计”课程的基础上,对电子电路设计、仿真与 PCB 设计方面的基础知识、软件使用、设计经验等内容进行整理和总结而编写完成此书。

本书共分为 11 章,其中第 1 章为电路设计与仿真概论;第 2~6 章主要介绍电路设计与仿真技术;第 7~9 章主要介绍电路原理图及 PCB 设计;第 10、11 章主要介绍 PCB 信号完整性设计及仿真。各章知识点如下:

第 1 章,介绍电子设计自动化技术的发展及现状,并对当前应用于电子电路设计与仿真的主流软件进行介绍。

第 2、3 章,介绍电子电路仿真的基本工具 Spice,包括 Spice 仿真描述语言和基本的 Spice 模型,并以 Altium Designer 18.0 为例,讲解电子电路设计及仿真过程。

第 4 章,介绍射频电路设计及仿真常用的工具,并以 ADS 2017 为例,讲解射频电路设计及其 S 参数仿真,并给出两个射频电路设计及仿真的实例。

第 5 章,介绍数字电路设计及仿真常用的工具,并以 ModelSim 10.5 为例,讲解数字电路的设计及其逻辑仿真和时序仿真的方法,给出与其他 FPGA 开发工具软件联合进行仿真的实例。

第 6 章,介绍单片机控制电路设计及仿真常用的工具,并以 Proteus VSM 为例,讲解单片机电路的设计及单片机程序仿真。

第 7~9 章,介绍电路原理图和 PCB 设计的流程,并以 Altium Designer 18.0 为例,讲解原理图和 PCB 绘制方法,以及 PCB 设计中的布局、布线的规则。

第 10、11 章,介绍信号完整性和电源完整性问题,并以 Altium Designer 18.0 为例,讲解信号与电源完整性的仿真方法。

附录部分给出了 Altium Designer 18.0 快捷键、设计实例的原理图和基本元器件识别及丝印等。

需要说明的是,本书采用的 Altium Designer 18.0、ModelSim 10.5、Proteus VSM 及 ADS 2017 软件汉化不完整,所以由其生成的部分图形存在中英文混用的情形,其中的电子元器件图形符号也是软件库自带,非我国国标符号。



# 前言

在本书的编写过程中得到了大量的帮助和支持。特别感谢清华大学出版社盛东亮编辑对本书出版工作的支持。特别感谢张建、陈铁方、陈乾、王小燕等对本书的资料进行整理及校对。感谢 Altium 公司大中华区大学计划经理华文龙,提供了本书中 Altium 软件电源完整性部分的推荐和介绍。感谢何宾、冯新宇、于斌、王博等作者,他们编著的关于电子设计及仿真的相关教材为本书的撰写提供了很大的帮助。

尽管作者在编写本书的过程中倾尽心力,但是由于水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者不吝赐教。

作者

2019年6月

## 图书资源支持

感谢您一直以来对清华版图书的支持和爱护。为了配合本书的使用,本书提供配套的资源,有需求的读者请扫描下方的“书圈”微信公众号二维码,在图书专区下载,也可以拨打电话或发送电子邮件咨询。

如果您在使用本书的过程中遇到了什么问题,或者有相关图书出版计划,也请您发邮件告诉我们,以便我们更好地为您服务。

### 我们的联系方式:

地址:北京市海淀区双清路学研大厦 A 座 701

邮编:100084

电话:010-62770175-4608

资源下载:<http://www.tup.com.cn>

客服邮箱:[tupjsj@vip.163.com](mailto:tupjsj@vip.163.com)

QQ: 2301891038 (请写明您的单位和姓名)

资源下载、样书申请



书圈



扫一扫,获取最新目录

用微信扫一扫右边的二维码,即可关注清华大学出版社公众号“书圈”。

<b>第 1 章 电路设计与仿真简介</b> .....	<b>1</b>
1.1 绪论 .....	1
1.2 模拟电路设计及仿真工具 .....	2
1.2.1 NI Multisim .....	3
1.2.2 Cadence PSpice .....	4
1.2.3 Synopsys HSpice .....	5
1.2.4 MATLAB/Simulink .....	6
1.2.5 Altium Designer .....	6
1.3 数字电路设计及仿真工具 .....	7
1.3.1 ModelSim .....	8
1.3.2 Quartus Prime .....	9
1.3.3 Vivado .....	10
1.4 射频电路设计及仿真工具 .....	11
1.4.1 ADS .....	11
1.4.2 HFSS .....	13
1.4.3 CST .....	14
1.5 控制电路设计及仿真工具 .....	15
1.6 电路板设计及仿真工具 .....	17
1.6.1 Altium Designer .....	17
1.6.2 Allegro PCB Designer .....	18
1.6.3 PADS .....	19

## 第一部分 电路设计与仿真

<b>第 2 章 Spice 仿真描述与模型</b> .....	<b>23</b>
2.1 电子电路 Spice 描述 .....	24
2.1.1 Spice 模型及程序结构 .....	24
2.1.2 Spice 程序相关命令 .....	29
2.2 电子元器件及 Spice 模型 .....	33
2.2.1 基本元器件 .....	33
2.2.2 电压和电流源 .....	36
2.2.3 传输线 .....	40
2.2.4 二极管和晶体管 .....	43
2.3 从用户数据中创建 Spice 模型 .....	52

# 目录

2.3.1	Spice 模型的建立方法 .....	53
2.3.2	运行 Spice 模型向导 .....	53
<b>第 3 章</b>	<b>电子电路设计与仿真 .....</b>	<b>60</b>
3.1	直流工作点分析 .....	60
3.1.1	建立新的直流工作点分析工程 .....	60
3.1.2	添加新的仿真库 .....	60
3.1.3	构建直流分析电路 .....	62
3.1.4	设置直流工作点分析参数 .....	63
3.1.5	直流工作点仿真结果分析 .....	63
3.2	直流扫描分析 .....	64
3.2.1	打开前面的设计 .....	65
3.2.2	设置直流扫描分析参数 .....	65
3.2.3	直流扫描仿真结果分析 .....	65
3.3	交流小信号分析 .....	68
3.3.1	建立新的交流小信号分析工程 .....	68
3.3.2	构建交流小信号分析电路 .....	68
3.3.3	设置交流小信号分析参数 .....	71
3.3.4	交流小信号仿真结果分析 .....	72
3.4	瞬态分析 .....	74
3.4.1	建立新的瞬态分析工程 .....	74
3.4.2	构建瞬态分析电路 .....	75
3.4.3	设置瞬态分析参数 .....	76
3.4.4	瞬态仿真结果分析 .....	78
3.5	参数扫描分析 .....	78
3.5.1	打开前面的设计 .....	78
3.5.2	设置参数扫描分析参数 .....	79
3.5.3	参数扫描结果分析 .....	80
3.6	傅里叶分析 .....	81
3.6.1	建立新的傅里叶分析工程 .....	81
3.6.2	构建傅里叶分析电路 .....	81
3.6.3	设置傅里叶分析参数 .....	84
3.6.4	傅里叶仿真结果分析 .....	85
3.6.5	修改电路参数重新执行傅里叶分析 .....	85
3.7	噪声分析 .....	88
3.7.1	建立新的噪声分析工程 .....	89

3.7.2	构建噪声分析电路	89
3.7.3	设置噪声分析参数	90
3.7.4	噪声仿真结果分析	93
3.8	温度分析	93
3.8.1	建立新的温度分析工程	94
3.8.2	构建温度分析电路	94
3.8.3	设置温度分析参数	96
3.8.4	温度仿真结果分析	97
3.9	蒙特卡洛分析	98
3.9.1	建立新的蒙特卡洛分析工程	98
3.9.2	构建蒙特卡洛分析电路	98
3.9.3	设置蒙特卡洛分析参数	100
3.9.4	蒙特卡洛仿真结果分析	101
<b>第 4 章</b>	<b>射频电路设计与仿真</b>	<b>103</b>
4.1	S 参数仿真	103
4.1.1	S 参数的概念	103
4.1.2	S 参数在电路仿真中的应用	105
4.1.3	S 参数仿真面板与仿真控制器	105
4.1.4	S 参数仿真过程	110
4.1.5	基本 S 参数仿真	110
4.1.6	匹配电路设计	115
4.1.7	参数优化	123
4.2	谐波平衡法仿真	131
4.2.1	谐波平衡法仿真基本原理及功能	132
4.2.2	谐波平衡法仿真面板与仿真控制器	132
4.2.3	谐波平衡法仿真的一般步骤	139
4.2.4	单音信号 HB 仿真	140
4.2.5	参数扫描	141
4.3	功率分配器的设计与仿真	143
4.3.1	功分器的基本原理	143
4.3.2	等分型功分器	145
4.3.3	等分型功分器设计实例	146
4.3.4	比例型功分器设计	147
4.3.5	Wilkinson 功分器	148
4.3.6	Wilkinson 功分器设计	149

# 目录

4.3.7	电路仿真与优化	151
4.3.8	版图仿真	154
4.4	印刷偶极子天线的设计与仿真	158
4.4.1	印刷偶极子天线	159
4.4.2	偶极子天线设计	160
4.4.3	优化仿真	162
<b>第 5 章</b>	<b>数字电路设计与仿真</b>	<b>168</b>
5.1	数字电路设计及仿真流程	168
5.1.1	数字电路设计流程	168
5.1.2	ModelSim 工程仿真流程	170
5.2	仿真激励及文件	178
5.2.1	利用波形编辑器产生激励	179
5.2.2	采用描述语言生成激励	183
5.3	VHDL 仿真	189
5.3.1	VHDL 文件编译	189
5.3.2	VHDL 设计优化	191
5.3.3	VHDL 设计仿真	195
5.4	Verilog 仿真	201
5.4.1	Verilog 文件编译	201
5.4.2	Verilog 设计优化	203
5.4.3	Verilog 设计仿真	204
5.4.4	单元库	208
5.5	针对不同器件的时序仿真	209
5.5.1	ModelSim 对 Altera 器件的时序仿真	209
5.5.2	ModelSim 对 Xilinx 器件的时序仿真	219
<b>第 6 章</b>	<b>控制电路设计与仿真</b>	<b>228</b>
6.1	Proteus 系统仿真基础	228
6.2	Proteus 中的单片机模型	232
6.3	51 系列单片机系统仿真	234
6.3.1	51 系列单片机基础	234
6.3.2	在 Proteus 中进行源程序设计与编译	236
6.3.3	在 Keil $\mu$ Vision 中进行源程序设计与编译	240
6.3.4	Proteus 和 Keil $\mu$ Vision 联合调试	244
6.4	用 51 单片机实现电子秒表设计实例	248
6.5	AVR 系列单片机仿真	251

6.5.1 AVR 系列单片机基础 .....	252
6.5.2 Proteus 和 IAR EWB for AVR 联合开发 .....	253
6.6 用 AVR 单片机实现数字电压表设计实例 .....	261

## 第二部分 电路原理图及 PCB 设计

<b>第 7 章 印制电路板设计基础 .....</b>	<b>271</b>
7.1 印制电路板基础知识 .....	271
7.1.1 印制电路板的发展 .....	271
7.1.2 印制电路板的分类 .....	273
7.2 PCB 材质及生产加工流程 .....	275
7.2.1 常用 PCB 结构及特点 .....	275
7.2.2 PCB 生产加工流程 .....	276
7.2.3 PCB 叠层定义 .....	279
7.3 常用电子元器件特性及封装 .....	281
7.3.1 电阻元器件特性及封装 .....	281
7.3.2 电容元器件特性及封装 .....	286
7.3.3 电感元器件特性及封装 .....	293
7.3.4 二极管元器件特性及封装 .....	295
7.3.5 三极管元器件特性及封装 .....	301
7.4 集成电路芯片封装 .....	303
7.5 自定义元器件设计流程 .....	308
<b>第 8 章 电路原理图设计 .....</b>	<b>310</b>
8.1 原理图绘制流程 .....	310
8.1.1 原理图设计规划 .....	311
8.1.2 原理图绘制环境参数设置 .....	312
8.2 原理图元器件库设计 .....	312
8.2.1 元器件原理图符号术语 .....	313
8.2.2 为 LM324 器件创建原理图符号封装 .....	314
8.2.3 为 XC2S300E-6PQ208C 器件创建原理图符号封装 .....	317
8.2.4 分配器件模型 .....	319
8.2.5 元器件主要参数功能 .....	322
8.2.6 使用供应商数据分配元器件参数 .....	323
8.3 原理图绘制及检查 .....	324
8.3.1 绘制原理图 .....	325



# 目录

8.3.2	添加设计图纸 .....	325
8.3.3	放置原理图符号 .....	326
8.3.4	连接原理图符号 .....	328
8.3.5	检查原理图设计 .....	328
8.4	导出原理图至 PCB .....	332
8.4.1	设置导入 PCB 编辑器工程选项 .....	332
8.4.2	使用同步器将设计导入到 PCB 编辑器 .....	332
8.4.3	使用网表实现设计间数据交换 .....	333
<b>第 9 章</b>	<b>印制电路板 PCB 设计 .....</b>	<b>336</b>
9.1	PCB 设计流程及基本使用 .....	336
9.1.1	PCB 层标签 .....	336
9.1.2	PCB 视图查看命令 .....	337
9.1.3	自动平移 .....	338
9.1.4	显示连接线 .....	339
9.2	PCB 绘图对象及绘图环境参数 .....	339
9.2.1	电气连接线 .....	340
9.2.2	普通线 .....	342
9.2.3	焊盘 .....	342
9.2.4	过孔 .....	343
9.2.5	弧线 .....	343
9.2.6	字符串 .....	344
9.2.7	原点 .....	345
9.2.8	尺寸 .....	346
9.2.9	坐标 .....	346
9.2.10	填充 .....	347
9.2.11	固体区 .....	347
9.2.12	多边形覆铜 .....	348
9.2.13	禁止布线对象 .....	351
9.2.14	捕获向导 .....	351
9.2.15	PCB 选项对话框参数设置 .....	352
9.2.16	栅格尺寸设置 .....	352
9.2.17	视图配置 .....	354
9.2.18	PCB 坐标系统的设置 .....	356
9.2.19	设置选项快捷键 .....	356
9.3	PCB 元器件封装库设计 .....	356

9.3.1	使用 IPC Footprint Wizard 创建元器件 PCB 封装 .....	357
9.3.2	使用 Component Wizard 创建元器件 PCB 封装 .....	360
9.3.3	使用 IPC Footprints Batch Generator 创建元器件 PCB 封装 .....	363
9.3.4	不规则焊盘和 PCB 封装的绘制 .....	364
9.3.5	添加 3D 封装描述 .....	368
9.3.6	检查元器件 PCB 封装 .....	369
9.4	PCB 设计规则 .....	370
9.4.1	添加设计规则 .....	370
9.4.2	如何检查规则 .....	373
9.4.3	AD 中相关规则 .....	375
9.5	PCB 布局设计 .....	377
9.5.1	PCB 板形状和尺寸设置 .....	377
9.5.2	PCB 布局规则的设置 .....	378
9.5.3	PCB 布局原则 .....	378
9.5.4	PCB 布局中的其他操作 .....	381
9.6	PCB 布线设计 .....	382
9.6.1	交互布线线宽和过孔大小设置 .....	382
9.6.2	交互布线线宽和过孔大小规则设置 .....	383
9.6.3	处理交互布线冲突 .....	384
9.6.4	其他交互布线选项 .....	385
9.6.5	交互多布线 .....	386
9.6.6	交互差分对布线 .....	387
9.6.7	交互布线长度对齐 .....	389
9.6.8	自动布线 .....	390
9.6.9	布线中泪滴的处理 .....	393
9.6.10	布线阻抗控制 .....	394
9.6.11	设计中关键布线策略 .....	395
9.7	PCB 覆铜设计 .....	397
9.8	PCB 设计检查 .....	399

## 第三部分 信号完整性分析与设计

第 10 章	信号完整性设计 .....	405
10.1	信号完整性 .....	405
10.1.1	信号时序完整性 .....	405