

北京高等教育精品教材

国家电工电子教学基地系列教材

# 现代电路分析

(第2版)

杜普选摇高摇岩摇闻摇跃摇编著  
左摇垵摇主审

清华大学出版社  
北京交通大学出版社

· 北京 ·



# 国家电工电子教学基地系列教材 编审委员会成员名单

主任委员 谈振辉

副主任委员 张思东 赵尔沅 孙雨耕

委员 (以姓氏笔画为序)

王化深 卢先河 刘京南 朱定华 沈嗣昌

严国萍 杜普选 李金平 李哲英 张有根

张传生 陈后金 邹家<sub>录</sub> 郑光信 屈波

侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞 廖桂生

薛质 戴瑜兴

---

# 总 序

---

当今信息科学技术日新月异，以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才，促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高，都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来，国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践，探索了各课程的认知规律，确定了科学的教育思想，理顺了课程体系，更新了课程内容，融合了现代教学方法，取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果，在借鉴国内外同类有影响教材的基础上，决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色：

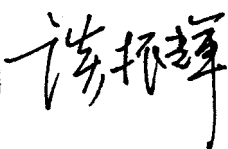
- 在教育思想上，符合学生的认知规律，使教材不仅是教学内容的载体，也是思维方法和认知过程的载体。
- 在体系上，建立了较完整的课程体系，突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系，体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。
- 在内容上，体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系，反映当今信息科学与技术的新概念和新理论，内容阐述深入浅出，详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题，培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。
- 在辅助工具上，注重计算机软件工具的运用，使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用，提高了学习效率和效果。

本系列教材包括：

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信号处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》（含上、下册）、《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北京交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持，在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助，在此表示衷心的感谢。

摇摇 摇摇北京交通大学  
“国家电工电子教学基地系列教材”  
摇摇摇摇编审委员会主任

摇摇 

摇摇摇摇摇摇圆原年 员月

---

## 第 2 版前言

---

本书所涉及的内容为现代电路理论部分，~~2014~~2014年出版以后，被列为北京市高等教育精品教材立项项目。在经过两届本科生教学实践和吸纳了读者意见、建议的基础上，我们对本书进行了重新修订。

本次修订充实和调整了第 1 章 猿 远 愿章的内容。第 1 章增加了数值分析的概念，目的是提醒读者在利用计算机语言编程分析电路时要注意的问题，这在工程上是十分重要的。第 2 章充实了习题，增加了习题数量，并严格筛选了原来的习题，使得列入的题目全部可以使用。鉴于第 3 章的内容在实用上应该进一步发展，所以重新编写，增加了不少在工程中可以实际使用的内容，以培养学生解决实际问题的能力。第 4 章全部重新编写，主要是适应电路工具软件的升级换代，因为原来的 ~~MATLAB~~ 软件已经换代为 ~~Python~~。同时对新的工具软件的扩展功能、例题、习题进行了精心安排，以充分发挥工具软件的作用。

另外，为了使本书更加实用，特开发了配套的网络课件，并且精心制作了电子教案，同时对所有的习题编制了详尽的题解。读者对本书有什么意见和建议，请发电子邮件和作者联系，邮件地址 ~~zhangyue@pku.edu.cn~~。  
感谢读者和同行对本书的关心和批评指正。

作 者  
~~2014~~2014 年 1 月

---

## 第1版前言

---

约在 1950 年前，电路分析与设计很少运用计算方法。当时一个熟练的设计者只要进行少量的计算就能够综合出简单的电路，然后安装在实验板上进行测试、修改，从而获得满意的结果。

现在的情况已大不相同了。由于集成电路的出现，使得手工计算或简单的计算工具远远不能满足要求，从而使得计算机的应用越来越普遍。反过来，集成电路的发展使得计算机更可靠、更便宜，而新的计算机又使集成电路的设计更为简便，以至于许多个人均已购置了计算机。毋庸置疑，计算方法将会变得越来越重要。从另一角度看，科技发展已使一个芯片上能包含百万计的晶体管，显然这种芯片的设计不能在实验板上实现，所以必须要使用计算机来仿真。

近年来，社会对工程技术人员分析问题与解决问题的能力、综合运用基础理论的能力和工程软件的应用能力要求愈来愈高，要求技术人员既要掌握扎实的基本理论知识也要能熟练运用专业软件工具。

目前电路分析仿真软件的使用已经非常普及，已成为实际电路设计中的重要工具。引入计算机方法，将软件仿真方法作为必修内容来要求，这样做对学生的益处是：①计算机方法与理论学习相结合，可补充理论学习，加深对概念的理解；②掌握一种电路仿真软件的使用方法，为后续课程学习和实际工作做好准备；③利用仿真软件提供的更接近于实际器件的模型，接触到实际电路的知识；④利用虚拟实验，了解实际的电路搭建和测量知识。

基于上述理由，我们重新规划了电路分析的知识点，将电路分析分为两部分，即基础电路分析部分和现代电路分析部分。

本书所涉及的内容为现代电路分析部分。教材在内容选择与要求方面，强调基本概念和方法，适当淡化手工计算技巧；介绍实际应用背景，增加一些综合性分析、简单设计问题。将工程方法、计算机方法与电路理论教学有机地结合，可以促进学生对理论的理解，培养解决实际问题能力，弥补在动手试验方面的不足，激发学习兴趣和积极思考，培养分析和解决问题的能力。

本书第 5 章引入了矩阵和计算机数值方法，从而可以使用更为规范的方式来建立方程；把分析理论与数值分析方法结合起来，这就是本书第 5 章、

第 猿章所讨论的主要问题，即矩阵分析法和建立方程的一般方法。

本书第 源章介绍了非线性电阻电路分析。除非线性电路的基本概念外，侧重讨论非线性电路线性化方法的基本思路。非线性电路的求解是非常复杂的问题，涉及大量高深的数学知识，即使使用大容量的计算机，其分析效率也十分低下。其实，在大部分仿真或模拟过程中并不一定要求非常高的精度，可以采用近似的方法来解决该类问题，即把非线性电路用分段线性电路来近似代替。

本书第 缘章介绍双端口网络的分析，这部分内容包括各种网络函数分析、网络的连接、传输的概念，以及分布参数网络的分析。

本书第 远章专门讨论含运算放大器电路的基本分析方法及典型应用，并以较为典型的半导体器件厂商配齐的线性集成有源滤波器产品为实例来进行分析。

随着大规模集成电路和电子计算机的迅速发展，电子电路的分析与设计方法发生了重大变革。以计算机辅助分析与设计为基础的电子设计自动化技术已广泛应用于集成电路与系统的设计之中，改变了以定量估算和电路实验为基础的传统设计方法，成为现代电子系统设计的关键技术之一，是必不可少的工具与手段。

目前国内外流行最广的当属 杂牌 (杂牌) 电子计算机。它已发展成为一个家族，具有功能强、速度快、精度高、容量大、使用方便等优点。其中 杂牌公司推出的、基于美国加州大学伯克利分校 杂牌的微机版本 杂牌倍受青睐，具有广阔的应用前景。第 苑章介绍了 杂牌的概况和应用。

宰宰是另一个界面相当友好的仿真软件，该软件具有十分形象的虚拟常用仪器。利用它来分析电路，就如同置身于设备先进、齐全的现代化实验室中，可以方便、快速、准确地得到分析结果。本书第 愿章将加以介绍。

运用上述工具，通过电路举例与习题，系统、深入地分析计算电路课程中各章节的主要典型电路，并由计算结果，分析讨论电路（或器件）的工作原理、性能特点、技术指标、影响电路性能的主要参数以及电路设计等问题，这样就将电路分析内容与 杂牌（杂牌）及 杂牌（杂牌）技术紧密结合在一起。通过实例分析与设计，一方面使读者具有使用集成电路和电子系统计算机辅助分析与设计工具的能力，掌握现代电路分析技术与方法；另一方面使读者更深入地学习和理解电路分析课程中各章节内容的原理、特点及应用，提高分析问题和解决问题的能力，扩展知识面，为今后从事电路和系统设计、进入电子设计自动化领域打下良好基础。这就是编写本书的主要目的，也是本书的一个特点。

本书由杜普选主编。第 员 圆 猿 远章由杜普选编写，第 源 缘章由高岩编写，第 苑 愿章由闻跃编写。全书由左垵教授主审。本书的编写得益于很多老师和研究生的支持与帮助：左垵先生虽年事已高，但认真严谨的作风令作者十分敬佩，本书的最后完成，离不开他的认真指导和鼓励。养雪琴老师为本书搜集整理

了许多相关资料，张源、陈海航、李栋、陶峰同学对本书的录入及排版工作付出

了辛勤的劳动，谨此表示致谢。

鉴于作者的水平有限，书中内容难免有不当之处，编排中也可能存在一些错误，敬请读者批评指正。

作译者

2024年 月

---

# 目 录

---

电路理论部分常用符号说明	员
第 员章 矩阵运算的计算机方法及稀疏矩阵	员
摇摇 摇摇 计算数学的几个基本概念	员
摇摇 摇摇 高斯消元法解线性方程组	猿
摇摇 摇摇 摇摇 例题分析	源
摇摇 摇摇 摇摇 算法说明	缘
摇摇 摇摇 摇摇 选主元素	苑
摇摇 摇摇 摇摇 分解法解线性方程组	苑
摇摇 摇摇 摇摇 算法说明	愿
摇摇 摇摇 摇摇 例题分析	怨
摇摇 摇摇 摇摇 稀疏矩阵原理	员园
摇摇 摇摇 摇摇 选主元和排序	员园
摇摇 摇摇 摇摇 稀疏矩阵存储	员猿
摇摇 摇摇 摇摇 复频率与复平面	员缘
摇摇 摇摇 摇摇 习题	员愿
第 圆章 电路的矩阵分析	圆园
摇摇 摇摇 摇摇 网络拓扑	圆园
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 图	圆园
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 树	圆园
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 割集	圆园
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 环集	圆园
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 对偶性	圆缘
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 矩阵分析法	圆苑
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 标准支路	圆苑
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 割集矩阵	圆苑
摇摇 摇摇 摇摇 摇摇 环集矩阵	圆苑

摇摇源关联矩阵 .....	猿
摇摇源网孔分析 .....	猿
摇摇源有源电路 .....	猿
摇摇源转移阻抗耦合 .....	猿
摇摇源互感 .....	猿
摇摇源转移导纳耦合 .....	源
摇摇源普遍化 .....	源
摇摇源含相互耦合的四端网络元件 .....	源
摇源节点导纳矩阵 .....	源
摇摇源节点导纳矩阵的填写方法 .....	源
摇摇源节点电压法 .....	源
摇摇源归一化问题 .....	源
摇习题 .....	源
第 猿章 建立方程的一般方法 .....	缘
摇猿表矩阵法 .....	缘
摇摇猿表矩阵方程的建立 .....	缘
摇摇猿单图表矩阵 .....	缘
摇猿用单图建立改进的节点方程组 .....	源
摇摇猿基尔霍夫方程的分组表示 .....	源
摇摇猿建立单图改进的节点方程组 .....	源
摇猿用观察法建立改进节点方程组 .....	源
摇摇猿理想元件的改进节点法表示 .....	源
摇摇猿观察法建立改进的节点方程 .....	源
摇摇猿有源网络的改进节点方程 .....	源
摇猿分离的电流和电压图 .....	苑
摇摇猿分离的电压图和电流图的规则 .....	苑
摇摇猿双图的表示方法及方程的建立 .....	苑
摇猿用 陨图和 灾图建立改进节点方程组 .....	苑
摇摇猿计算机上图的表示 .....	苑
摇摇猿双图改进的节点法 .....	苑
摇摇猿理想元件的双图表示及填入 .....	愿
摇猿建立方程组的方法总结 .....	愿
摇习题 .....	愿
第 源章 非线性电路直流分析 .....	愿

摇源原摇非线性电阻电路及其方程的建立 .....	源
摇摇源原原摇非线性电阻元件 .....	源
摇摇源原原摇非线性电阻电路的电路方程 .....	源
摇源原摇非线性电阻电路的图解分析法 .....	源
摇摇源原原摇非线性电阻的串联与并联 .....	源
摇摇源原原摇非线性电阻电路的图解分析法 .....	源
摇源原摇非线性电阻电路的分段线性分析法 .....	源
摇摇源原原摇非线性电阻元件伏安特性曲线的分段线性化 .....	源
摇摇源原原摇用分段线性法确定非线性电阻电路的工作点 .....	源
摇源原摇具有一个非线性电阻电路的牛顿迭代法 .....	源
摇摇源原原摇一元牛顿迭代法 .....	源
摇摇源原原摇非线性电阻电路的牛顿迭代分析法 .....	源
摇摇源原原摇牛顿迭代法的几何解释 .....	源
摇摇源原原摇牛顿迭代法的电路解释 .....	源
摇源原摇一般非线性电路 .....	源
摇摇源原原摇推广的牛顿迭代法 .....	源
摇摇源原原摇用牛顿迭代法进行分析 .....	源
摇摇源原原摇非线性直流节点分析法 .....	源
摇习题 .....	源
第 缘章摇双口网络分析 .....	源
摇缘原原摇网络函数 .....	源
摇摇缘原原摇策动点函数 .....	源
摇摇缘原原摇传递函数 .....	源
摇缘原原摇双口网络函数 .....	源
摇摇缘原原摇再参数和 在参数 .....	源
摇摇缘原原摇传输参数或链接参数 .....	源
摇缘原原摇双口网络的连接 .....	源
摇摇缘原原摇链接 .....	源
摇摇缘原原摇并联 .....	源
摇摇缘原原摇串联 .....	源
摇缘原原摇特性参数及波参数理论 .....	源
摇摇缘原原摇双口网络的特性阻抗 .....	源
摇摇缘原原摇双口网络的传输常数 .....	源
摇摇缘原原摇由特性参数表示的传输方程式 .....	源

摇摇缘缘缘分析和设计举例 .....	员远
摇摇缘缘缘两端口网络的匹配链接 .....	员园
摇摇缘缘缘传输线与波参数 .....	员猿
摇摇缘缘缘工作参数理论 .....	员怨
摇摇缘缘缘输入阻抗和反射系数 .....	员园
摇摇缘缘缘插入衰减 .....	员员
摇摇缘缘缘工作衰减 .....	员圆
摇摇习题 .....	员缘
 第 远章 摇摇运算放大器及有源滤波器 .....	员怨
摇摇缘缘缘理想运算放大器及单元电路 .....	员怨
摇摇缘缘缘理想运算放大器 .....	员怨
摇摇缘缘缘阻抗变换器 .....	员员
摇摇缘缘缘模拟电感及频变负载 .....	员圆
摇摇缘缘缘用运放实现 砸兑有源基本节 .....	员源
摇摇缘缘缘传递函数 .....	员源
摇摇缘缘缘归一化问题 .....	员远
摇摇缘缘缘一阶基本节 .....	员远
摇摇缘缘缘二阶单端正反馈电路 .....	员苑
摇摇缘缘缘二阶无限增益多端负反馈 .....	员怨
摇摇缘缘缘多运放实现的二阶基本节 .....	员园
摇摇缘缘缘有源滤波器实例 .....	员员
摇摇缘缘缘有源集成滤波器介绍 .....	员缘
摇摇习题 .....	员苑
 第 苑章 摇摇孕孕孕电路仿真软件 .....	员员
摇摇缘缘缘孕孕孕简介 .....	员员
摇摇缘缘缘电路仿真与电子设计自动化 .....	员员
摇摇缘缘缘孕孕孕功能与组成 .....	员圆
摇摇缘缘缘用孕孕孕分析电路的一般步骤 .....	员猿
摇摇缘缘缘孕孕孕分析电路的基本约定 .....	员源
摇摇缘缘缘孕孕孕中的元件 .....	员源
摇摇缘缘缘孕孕孕中的数字和单位 .....	员缘
摇摇缘缘缘电路图中的节点编号 .....	员缘
摇摇缘缘缘输出变量的基本表示格式 .....	员远
摇摇缘缘缘输出变量的别名表示 .....	员远

第 1 章 电路仿真软件的基本操作	1
1.1 电路仿真软件界面	1
1.2 建立仿真项目	10
1.3 仿真项目中的资源	11
1.4 元件放置与修改	11
1.5 常用元件符号和元件库	10
1.6 元件的属性	13
1.7 导线连接和节点标号	13
1.8 对电路的一些限制	14
1.9 电路分析基础	14
1.10 电路分析和仿真的操作界面	14
1.11 直流工作点	15
1.12 直流小信号传输函数	16
1.13 直流扫描分析	16
1.14 交流分析	16
1.15 暂态分析	16
1.16 参数分析	16
1.17 电路分析应用举例	16
1.18 直流小信号戴维南等效电路的计算	16
1.19 一阶 RC 电路的瞬态分析	16
1.20 运算放大器电路的参数分析	16
习题	16
第 2 章 电路仿真软件	17
2.1 电路仿真软件简介	17
2.2 什么是电路仿真	17
2.3 电路仿真原理	17
2.4 电路仿真的基本操作	17
2.5 电路仿真软件界面	17
2.6 仿真元件模型	17
2.7 电路分析与仿真的主要步骤	17
2.8 使用电路仿真的虚拟仪器	17
2.9 电路仿真的虚拟仪器	17
2.10 电路仿真虚拟测量实例	17
2.11 电路仿真电路分析	17

摇摇摇摇配阻器分析功能和参数设置 .....	圆源
摇摇摇摇直流工作点分析 .....	圆苑
摇摇摇摇直流扫描分析 .....	圆苑
摇摇摇摇交流分析 .....	圆怨
摇摇摇摇暂态分析 .....	圆怨
摇摇摇摇参数扫描分析 .....	圆园
摇摇摇摇直流小信号传递函数分析 .....	圆员
摇摇摇摇云模型分析 .....	圆圆
摇摇摇摇零极点分析 .....	圆猿
摇摇摇摇配阻器电路仿真和分析实例 .....	圆源
摇摇摇摇双极型电路瞬态分析和零极点分析 .....	圆源
摇摇摇摇非线性电路分析 .....	圆源
摇摇摇摇双极型双极带阻滤波器频率特性分析 .....	圆怨
摇摇摇摇积分器电路 .....	圆员
摇摇习题 .....	圆圆
部分习题答案 .....	圆苑
摇摇第 员章 .....	圆苑
摇摇第 圆章 .....	圆怨
摇摇第 猿章 .....	圆员
摇摇第 源章 .....	圆源
摇摇第 缘章 .....	圆缘
摇摇第 远章 .....	圆远
参考文献 .....	圆苑

# 电路理论部分常用符号说明

## (一)

月瑶瑶瑶电纳

砸 电阻

蕴 电感

悦 电容

郟 电导

酝 互感

载 电抗

再 导纳

在 阻抗

孕 功率

宰 能量

泽 复频率

$\sigma$  复频率的实部

$\omega$  实频率

## (二)

杂 开关

炷<sub>枝</sub> 树枝数

炷<sub>支</sub> 连支数

炷<sub>独</sub> 独立电压数

炷<sub>独</sub> 独立电流数

炷<sub>独</sub> 独立电压源数

炷<sub>独</sub> 独立电流源数

阅 割集矩阵

粤 关联矩阵

酝 网孔矩阵

悦 环集矩阵

藻 标准支路支路电压矢量

陨 标准支路独立电流源矢量

蚤 标准支路支路电流矢量

耘 标准支路独立电压源矢量

藻<sub>树</sub> 标准支路 藻矢量的树枝部分

增 标准支路矩阵元电压矢量

躁 标准支路矩阵元电流矢量

蚤<sub>连</sub> 标准支路电流矢量的连支部分

藻<sub>节</sub> 标准支路节点电压矢量

蚤<sub>网</sub> 标准支路网孔电流矢量

早 正向转移导纳

$\mu$  电压控制电压源控制量

则 正向转移阻抗

$\alpha$  电流控制电流源控制量

$\Omega$  归一化频率

再<sub>导</sub> 节点导纳矩阵

粤<sub>电</sub> 电流图关联矩阵

粤<sub>电</sub> 电压图关联矩阵

① 原电路节点号

▲ 电压图节点号

① 电流图节点号

匀<sub>参</sub> 匀<sub>参</sub>矩阵

栽 栽参数矩阵

在<sub>特</sub> 特性阻抗



$\theta$  传输常数

$\rho$	反射系数
$Z_L$	负载阻抗
$\gamma$	传输线传输常数
$U_{in}$	入射电压
$U_{ref}$	反射电压
$I_{in}$	入射电流
$I_{ref}$	反射电流
$P_{in}$	视在功率
$P_{in}$	输入功率
$P_{ref}$	反射功率
$P_L$	负载吸收的功率
$\alpha$	反射衰减
$\beta$	工作衰减
$\tau$	群时延
$\lambda$	波长

(三)

电流源	电流控制电压源
电压源	电压控制电流源
电流源	电流控制电流源
电压源	电压控制电压源
电阻	通用阻抗变换器
电容	频变负载
电感	传递函数
电阻	传递函数的品质因数
电压源	基尔霍夫电流定理
电压源	基尔霍夫电压定理
阻抗	阻抗分解法的简写
蕴	拉普拉斯算子
蕴 <sup>负</sup>	拉普拉斯逆运算算子

摇摇注：本书第 苑 愿章中，计算机软件 孕 贵 和 酝 运 所采用的仿真电路元件符号、元件单位和比例因子符号，有些与国标符号和本书其余章节的符号约定不相同。为了便于软件讲解，软件界面图形、仿真电路图和软件仿真结果的屏幕拷贝一律保持原样。在正文有关软件参数设置说明中，必要时也采用软件的约定。在第 苑 愿章习题中，有标准原理图与软件仿真电路图共存的情况，请读者注意不同类型图中符号差别。仿真电路图中元件符号、参数单位与国标的主要差别列于下表，其余不同点将在有关章节中加以说明。

名摇摇称	国摇标摇摇号	软摇件摇摇号
电摇摇阻		
电阻值单位（欧姆）	$\Omega$	燥或省略
电导值单位（西门子）	杂	皂或省略
比例因子符号（ $\mu$ ）	$\mu$	怎或 哉