

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANZI DIANQI
DIANLU FANGZHEN

电子电气 电路仿真

朱达群 施 围 著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANZI DIANQI
DIANLU FANGZHEN

电子电气 电路仿真

朱达群 施 围 著
叶蜚誉 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分13章, 主要内容包括电路模拟仿真原理、EESIM电路模拟仿真软件的使用、滤波器的设计及模拟仿真、电力电子电路模拟仿真、电子负荷电路的模拟仿真、仪表电路模拟仿真实例、电磁元件有关电路的模拟仿真、功能模块的模拟仿真、数字电路及混合信号电路的模拟仿真、谐振电路仿真实例、传输线的模拟仿真、倍压电路的模拟仿真、模拟计算收敛性分析和仿真的窍门与技巧。本书辑录了大量各种类型电路的模拟仿真实例, 目的是通过这些实例手把手地教会读者掌握模拟仿真技术, 同时引导读者掌握电气元件的建模技术。

本书可作为普通高等院校电气信息类专业的教学用书, 也可作为相关专业工程技术人员、进修工人及业余爱好者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子电气电路仿真/朱达群, 施围著. —北京: 中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-8213-5

I. 电… II. ①朱…②施… III. 电子电路—计算机仿真—高等学校—教材 ISBN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第203463号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://jc.cepp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年4月第一版 2009年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.5印张 226千字

定价 19.00元(含1CD)

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校、满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着计算机电脑科技的发展,电路模拟仿真已成为电路设计、电路性能分析以及故障探测不可缺少的工具。过去那种手工计算绘图设计,单纯依赖用面包板搭建样机、单纯依赖硬件测试电子电气电路技术已经一去不复返了。电子电气工程师们都在学习使用计算机辅助设计,使用模拟仿真来设计电路、分析电路性能,并进行故障探测。与此同时,电路模拟仿真也为电子电气工程教学开创了新的教学模式。教师们用电路模拟仿真示教,学生们用计算机电脑仿真学习电路的理论和实际。模拟仿真是很强大的工具,大大减少了工程技术人员的工作量,少走弯路,解决了有限的实验难以发现的客观规律,但最后结果还是要靠系统现场实测、实际的电子电路来核实。

近年来电子工程软件已有长足的发展。特别是在电子设计自动化(EDA)领域,电路设计、电路模拟仿真和电路性能分析相结合,为电子电气工程人员提供了有力的技术支持。然而目前电子电气电路的模拟仿真领域中存在两个障碍。一方面仿真软件变得越来越庞大复杂,不易为一般电气工程人员掌握,需要专门的“仿真工程师”才能知其奥秘。这就妨碍了模拟仿真的应用。另一方面,那些貌似方便易用的模拟仿真软件又很不透明,即一点击就出来结果,但不知此结果从何而来、是否可靠,亦不明如何应用。

盲目机械地套用电子工程软件,对解决工程实际问题帮助不大,在许多情况下,并不能得到所需的计算结果,或者得到的是不正确、不精确的结果。甚至可能引起误解,误用计算结果。对于学生和初学者,不正确地使用模拟仿真也可能导致误解电子电气电路的理论和实际工程问题。因此,在进行模拟仿真时对下列概念必须有明确的认识:

- (1) 所有模拟仿真都必须得到实际电路的证实,才能投入实际应用。
- (2) 模拟仿真并非真实电路,其正确性和准确性取决于其模拟方法的正确性和准确性。
- (3) 不同的应用目的需要不同的电路元件模型、不同的模拟仿真方法。要弄清模拟仿真的原理和实现的方式,不能机械地套用。
- (4) 电路模拟仿真技术本身是一门专门的学问,有许多领域存在各种问题,尚待研究开发。

电子电气模拟仿真软件 EESIM 致力于解决上述模拟仿真的障碍,实现简明易用和模拟仿真透明化的目标,使一般电气工程人员都能很快上手应用,同时又明了模拟仿真全过程。在电子电气模拟仿真领域,SPICE 类软件是主流。EESIM 与 SPICE 完全兼容且其功能大幅度扩展改进。因此本书以 EESIM 作为主要模拟仿真手段,深入浅出地介绍电路模拟的原理和各种分析方法、模拟仿真的应用,以及达到成功的模拟仿真的窍门和方法等。本书主要内

容包括：

- (1) 电路模拟计算原理、算法简介；
- (2) 各种电路分析的机理及其应用；
- (3) 电路模拟仿真软件的具体使用方法；
- (4) 收敛性分析及模拟仿真的窍门和技巧；
- (5) 各类电路模拟仿真典型实例。

本书辑录了大量各种类型电路的模拟仿真实例，这些电路都是实用电路，目的是通过这些实例手把手地教会读者掌握模拟仿真技术，同时引导读者掌握电气元件的建模技术。这些电路的模拟仿真结果都通过实验室验证而且具有很广的覆盖面，对各类电气工程人员都适用。

有关 EESIM 电子电气模拟仿真软件及其附属产品详情，请参阅 EESIM 网站：<http://www.eesim.net>，及其中文网页：<http://www.eesim.net/myweb1/index.html>。

本书的编排及章节内容如下：

第 1 章：电路模拟仿真原理。

概述电路微分方程组、矩阵描述及其解法。数值积分及其各种算法。

电路的各种分析方法的定义及其应用，包括直流工作点，直流扫描，频域分析，时域分析，传递函数，傅立叶分析，噪声分析，畸变分析等。

基本电路元件模拟模型及建模方法。

第 2 章：EESIM 电路模拟仿真软件的使用。

EESIM 设计绘图工具包的使用方法，电路元件选取、电路图连接、多层分电路结构的应用。

EESIM 各种电路分析方法的设定。模拟参数的意义及其设定。

EESIM 模拟仿真结果及其分析应用。

第 3~12 章分别介绍各种类型电子电气电路的模拟仿真实例。

第 3 章：滤波器的设计及模拟仿真。

EESIM 滤波器设计工具箱的使用。

巴特沃思类 (Butterworth) 及车贝晓夫类 (Chebyshev) 的低通、高通、带通、带阻滤波器电路实例的 EESIM 模拟仿真。

第 4 章：电力电子电路模拟仿真。

DC—DC 转换器的平均状态模型及其模拟仿真方法，电路模拟实例。

DC—DC 转换器中的开关组模型及其在电力电子电路仿真中的应用。

PWM 控制器 IC 的模拟仿真实例。

BUCK、BOOST、BUCK-BOOST、FLYBACK、FORWARD 实例电路的模拟仿真。

第 5 章：电子负荷电路的模拟仿真。

电子负荷电路的各部分的实际电路分别进行模拟。

第 6 章：仪表电路模拟仿真实例。

本书精选了多个典型性的仪表电路进行模拟仿真。这些电路的模拟仿真充分体现了其工作原理和设计应用。这些模拟实例也演示了 SPICE 对 555 timer，及 Op Amp 等集成电路元件的模拟模型。

第 7 章：电磁元件有关电路的模拟仿真。

交直流电机、变压器、电磁线圈、磁芯是电气电路的重要组成部分。

EESIM 模拟器拓展了这部分的模拟功能。本章通过实例展示如何模拟这些电磁元件。

第 8 章：功能模块的模拟仿真。

功能模块虽然不是具体现实的电路元件，而是电路元件或电路部分的抽象，但在电路设计过程某些阶段是非常重要的。另一方面功能模块又是电路元件行为模型的构成基础。本章精选了典型功能模块的模拟实例：运算模块、微积分模块、传递函数模块、各种限幅器及各种波形生成器等。

第 9 章：数字电路及混合信号电路的模拟仿真。

数字信号电路的仿真具有与模拟电路仿真不同的机理。它不需要对每个时间步长进行迭代而是采用事件驱动（event-driving）的计算方法。本章通过多个逻辑电路仿真实例来说明。

混合信号电路仿真是针对那些包含数字和模拟两部分的电路仿真。在两者的结合部都需插入某种 D/A 及 A/D 转换电路。本章也辑录了实例以利说明。

第 10 章：谐振电路仿真实例。

作为信号产生电路，谐振电路是较为特别的电路。成功的仿真需要对电路以及模拟仿真均有一定的认识。本章通过多个不同的谐振电路的实例来说明。

第 11 章：传输线的模拟仿真。

作为电气信号及干扰信号传输媒体的传输线是一项较为特别的电气元件。它以不同的形式存在于各种电子电气装置中。由于其分布参数的特性，模拟仿真尤具特殊性。本章介绍各种有损线及无损线的计算及模拟实例。

第 12 章：倍压电路的模拟仿真。

倍压电路是常见的电源电路部分。本章实例将加深读者对电路元件工作原理和分仿真过程的认识。

第 13 章：模拟计算收敛性分析和仿真的窍门与技巧。

仿真电路并不是硬件测试，它是建立在迭代计算的基础上。所有的迭代都需收敛到一个正确值上，因此计算的收敛性就是成功仿真的关键。第 3~12 章已就此分别作过一些描述，本章较深入地探讨模拟计算收敛性，并为读者总结出一套提高收敛性的方法。

概而言之，有了本书，读者就能在电子电气工程的模拟仿真领域奔驰上路了。读者如对本书及 EESIM 软件有任何问题和疑问。欢迎电邮反馈到：

daqun@eesim.net

support@eesim.net

作者将及时和读者交流。

编 者

2008 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 电路模拟仿真原理	1
1.1 改进节点法	1
1.2 改进节点矩阵和向量的形成	3
1.3 电路模拟的基本分析法	5
1.4 电路模拟仿真的其他分析法	13
第 2 章 EESIM 电路模拟仿真软件的使用	17
2.1 选取电气元件	17
2.2 电路图的连接绘制	21
2.3 设定模拟仿真模式	22
2.4 审视模拟仿真结果	27
2.5 EESIM 工具箱及支持程序	30
第 3 章 滤波器的设计及模拟仿真	33
3.1 滤波器的设计	33
3.2 EESIM 滤波器设计工具箱的使用	39
3.3 滤波器模拟仿真的电路实例	39
3.4 滤波器模拟仿真问题讨论	49
第 4 章 电力电子电路模拟仿真	51
4.1 平均状态空间模型 (State Space Averaged model)	52
4.2 PWM 开关组模型及其在平均模型建模中的应用	53
4.3 用开关网络建立 DC—DC 变换器平均模型的方法及电路模拟仿真实例	55
4.4 电压模式变换器平均模型与电流模式变换器平均模型	60
第 5 章 电子负荷电路的模拟仿真	69
5.1 电子负荷功率级电路的模拟仿真	69
5.2 正电源产生负电源的转换电路	72
5.3 电子负荷的电流调节和脉冲负荷	73
5.4 功率限幅电路	74
第 6 章 仪表电路模拟仿真实例	76
6.1 555 计时器电路的模拟仿真	76
6.2 运算放大器组成的模拟计算器电路	79
6.3 窗口探测器	81
6.4 晶体管放大电路	82
6.5 反相增益电路	85

第 7 章 电磁元件有关电路的模拟仿真	87
7.1 变压器模拟仿真	87
7.2 磁芯线圈的模拟仿真	90
7.3 直流电机模拟仿真	92
7.4 三相感应电机的模拟仿真	94
第 8 章 功能模块的模拟仿真	97
8.1 运算模块的模拟仿真	97
8.2 限幅器功能块的模拟仿真	99
8.3 波形发生器的模拟仿真	102
第 9 章 数字电路及混合信号电路的模拟仿真	105
9.1 数字电路模拟及 A/D 与 D/A 转换	105
9.2 混合信号电路模拟仿真	106
9.3 二进位计数器	107
9.4 二进位解码器	108
9.5 阶梯波电路	111
第 10 章 谐振电路仿真实例	113
10.1 石英晶体振荡器的模拟仿真	113
10.2 四阶低通巴特沃思型振荡器	115
10.3 反相方波发生器	116
10.4 无直流偏移的四阶低通巴特沃思型振荡器	117
10.5 利用比较器 LM111 构成的振荡电路	118
第 11 章 传输线的模拟仿真	120
11.1 传输线的工作原理和计算原理	120
11.2 EESIM 传输线模型	122
11.3 几种常见的传输线参数的计算	123
11.4 多导体耦合传输线及 PCB 串扰问题	124
11.5 传输线模拟仿真实例	125
第 12 章 倍压电路的模拟仿真	129
12.1 传统交流一直流倍压电路	129
12.2 串接倍压电路和桥式整流倍压电路	130
12.3 四倍压及八倍压电路	130
第 13 章 模拟计算收敛性分析和仿真的窍门与技巧	133
13.1 模拟计算的收敛性	133
13.2 直流工作点分析中的收敛性问题	134
13.3 暂态分析中的收敛性问题	135
13.4 模拟仿真环境参数的设定	136
13.5 收敛性问题的解决途径和窍门	137
参考文献	142

第1章 电路模拟仿真原理

电路模拟仿真是指用计算机输入和表达电路的有关信息,并对电路进行分析计算的过程。通过分析计算得到电路在各种工作条件下的行为,并求得相应的电气变量及参数。整个过程如同建立和测试真实电路一样。计算机的电路模拟仿真软件一般包含两个主要的部分:电路的绘制表达(Capture)工具;电路分析计算软件,即模拟器(Simulator)。前者主要处理图形及其代表的数,这不在本书的讨论范围之内。而后者,电路分析计算软件则是本章的主要课题。

与人工的电路计算一样,计算机的电路计算也是基于解算电路的方程式。由电路理论可知,电路的方程表达有两种主要的形式,即回路法和节点法。回路法按电路的封闭回路列出方程求解。它一般可用于平面电路。此时每个网眼联系一个回路方程,全部网眼可以联合求解。当电路拓扑为非平面时,回路有多种不同的组合,因而并不适合计算机模拟的操作。在计算机模拟仿真中,由于节点法可以得到唯一的方程表达,便于操作,因此计算机模拟仿真使用最多的是节点法。在技术发展过程中,节点法又进一步发展成改进节点法(Modified Nodal Analysis, MNA)。EESIM 以及大多数 SPICE 类的模拟器都使用改进节点法。

模拟仿真的第一步是建立一个自动构成节点矩阵的机制。此机制用于形成节点方程的矩阵,然后使用各种矩阵计算的技术来解节点方程。在频域分析(即交流扫描)及与之相关的各种其他的分析计算中,储能元件即电感、电容的参数都是复数变量,因此整个解算过程是在复数域进行的。

对于线性电路来说,所有的电路元件都是线性元件。但电子电气电路中存在许多非线性元件,大部分的半导体元件及磁性元件都是非线性的,即它们的电阻、电感、电容并非定值,而是其他电路变量(如电流、电压等)的函数。在人工计算中,可以用解析的方法来解算这些非线性方程组。解析法主要依靠求解人的知识和技能,是不适宜直接作计算机模拟计算的。适合计算机计算的方式是数值计算。所谓数值计算,就是将非线性方程围绕一个工作点线性化,在计算中采用迭代法,使之收敛到一个解上,使用最为普遍的是牛顿-拉弗逊法。随之而来的问题是,计算是否能收敛和收敛的速度有多大。因此,许多模拟仿真的技术围绕着收敛问题展开。

本章以 EESIM 实现的模拟仿真方法为基础,简明扼要地说明电路分析的典型方法。从介绍改进节点法开始,了解各种电气元件输入的规律形式,了解自动生成导纳矩阵的方法。在此基础上,本章详细介绍主要的三种电路分析方法,即直流分析、交流分析和暂态分析的计算原理;然后简要说明其他几种分析方法,即直流传递函数分析、噪声分析、零极点分析和傅立叶分析(即畸变分析);最后就各种主要的电子器件的模拟模型构成、等值电路的结构以及元件的建模方法作详细的介绍。

1.1 改进节点法

设一个电路具有 n 个节点,按照克希霍夫定律,可以循下列方法列出节点矩阵方程:

- (1) 选择一个参考节点，通常是接地点。
- (2) 给所有其他节点编号，并给所有无源支路编号。
- (3) 按照克希霍夫定律列出方程组

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

亦即

$$\mathbf{Y}\mathbf{v} = \mathbf{I} \quad (1.2)$$

节点法的一个问题是，当电路中存在非接地的电压源（悬浮电源）时需要特殊的办法来处理。通常用手计算可以解决此问题，靠计算机自动处理就较难。解决这个问题的方法是，将所有流过电压源的电流当作新的未知量列入方程组中。具体方法如下：

- (1) 选择一个参考节点，通常是接地点，为所有电流源编号。
- (2) 将所有通过电压源的电流作为未知量，假定其正向由正极流入。
- (3) 按照克希霍夫定律列出节点电压方程组。
- (4) 为每个电压源列出方程式。

设电路有 n 个节点和 m 个电压源（不论是独立的还是被控的），则列出 $n+m$ 阶的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nn} & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \\ z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} & u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} & u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} & u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \\ i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

式 (1.3) 仍然可用式 (1.2) 来代表，此时 $\mathbf{Y}$ 矩阵的元素不都是导纳，还有其他元素。简而言之，其中 $n \times n$ 个 y 元素是电路连接决定的，而 $n \times m$ 个 x 元素是电压源的连接所决定的，还有 $m \times n$ 个 z 元素亦是电压源的连接所决定的，再有 $m \times m$ 个 u 元素常为零（相应于电流控制电压源的除外）。写成矩阵表达为

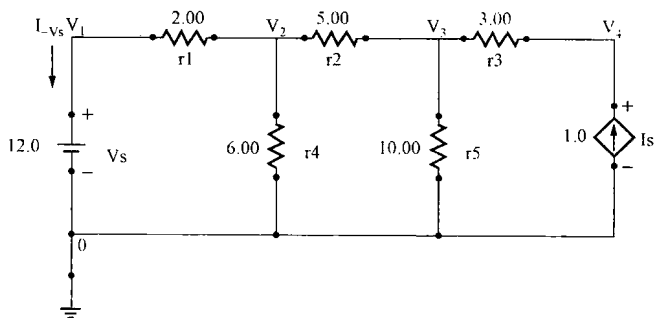


图 1.1 改进节点法电路实例

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

方程式 (1.4) 即是改进节点法的方程。它将解决电路存在悬浮电压源所引起的困难。

现在通过一个电路实例来看看改进节点法电路方程的形成。首先按克希霍夫定律给图 1.1 所示的电路列出节点电压方程组，则

$$I_{-v_s} + \frac{V_1 - V_2}{r_1} = 0 \quad (\text{节点 1})$$

$$\frac{V_2 - V_1}{r_1} + \frac{V_2}{r_4} + \frac{V_2 - V_3}{r_2} = 0 \quad (\text{节点 2})$$

$$\frac{V_3 - V_2}{r_2} + \frac{V_3}{r_5} + \frac{V_3 - V_4}{r_3} = 0 \quad (\text{节点 3})$$

$$\frac{V_4 - V_3}{r_3} - I_s = 0 \quad (\text{节点 4})$$

然后给电压源列出方程为

$$V_s = V_1 \quad (\text{电压源})$$

上述方程组的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{r_1} & -\frac{1}{r_1} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} & \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_2} & \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_3} & -\frac{1}{r_3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r_3} & \frac{1}{r_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ I_{-v_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_s \end{bmatrix}$$

上式中的矩阵和向量均划线分块。本例有 4 个节点， y 元素是 4×4 的导纳矩阵。

$$y = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_1} & -\frac{1}{r_1} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} & \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_2} & \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_3} & -\frac{1}{r_3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r_3} & \frac{1}{r_3} \end{bmatrix}$$

本例有一个电压源， x 元素和 z 元素分别为 1×4 和 4×1 的矩阵，取决于电压源的连接，有与电压源连接的节点为 1，否则为 0。

$$z = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$x = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

而 u 元素是 1×1 的矩阵， $u=0$ 。通过这个例子，可以很清楚地了解改进节点法概念。

在计算机处理改进节点法时，上述方程的矩阵和向量是可以由计算机自动生成的，而不需要像上面那样直接按电路原理人工输入生成。下面，建立一套为各种元件输入组建矩阵的机制。在模拟仿真软件中，计算机就是按下列机制生成电路矩阵的。为理解这个机制，读者可以按下述方法尝试直接生成上述电路的改进节点法电路矩阵，结果应与上面完全相同。

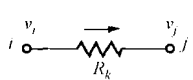
1.2 改进节点矩阵和向量的形成

EESIM 建立了一个机制来自动生成上述矩阵和向量，让计算机按照这个机制运行来生

成改进节点方程。不同的元件，其生成的规则不同。下面分别叙述各种元件生成矩阵及向量的规则。

1.2.1 电阻

连接在节点 i 和 j 之间的电阻 R_k ，将对 4 个 y 元素作出贡献，则

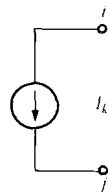


$$\left. \begin{aligned} y_{ii} &\leftarrow y_{ii} + \frac{1}{R_k} \\ y_{jj} &\leftarrow y_{jj} + \frac{1}{R_k} \\ y_{ij} &\leftarrow y_{ij} - \frac{1}{R_k} \\ y_{ji} &\leftarrow y_{ji} - \frac{1}{R_k} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

1.2.2 独立电流源

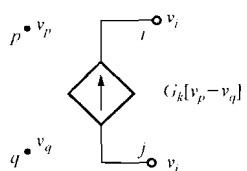
由节点 i 流向节点 j 的独立电流源 I_k 将给 I 向量的两个元素作贡献，则

$$\left. \begin{aligned} I_i &\leftarrow I_i - I_k \\ I_j &\leftarrow I_j + I_k \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$



1.2.3 电压控制电流源

节点 j 流向节点 i 的压控电流源，系数为 G_k ，将对 4 个 y 元素作出贡献，则

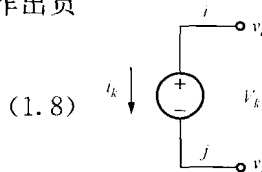


$$\left. \begin{aligned} y_{pi} &\leftarrow y_{pi} + G_k \\ y_{pj} &\leftarrow y_{pj} - G_k \\ y_{qi} &\leftarrow y_{qi} - G_k \\ y_{qj} &\leftarrow y_{qj} + G_k \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

1.2.4 独立电压源

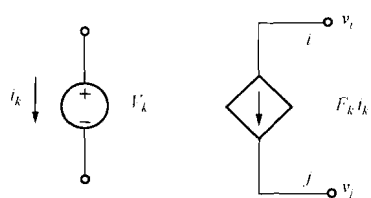
以 i 节点为正 j 节点为负的独立电压源 V_k ，其上通过的电流 I_k 是新未知量， V_k 和 I_k 分别是 V 和 I 向量构成元素。独立电压源对两个 z 元素和两个 x 元素作出贡献，则

$$\left. \begin{aligned} z_{ki} &= 1, & x_{ik} &= 1 \\ z_{kj} &= -1, & x_{jk} &= -1 \end{aligned} \right\}$$



1.2.5 电流控制电流源

对于电流控制电流源来说，控制电流是一个支路电流。一般支路电流并非输出量，只有那些流过独立电压源的电流才是输出量，因此就人为串接一个电压为零的独立电压源。此独立电压源是为测量控制电流而设的，应按 1.1 节独立电压源的规则接入。设其编号为 k ，控制增益为 F_k ，控制电流源将对两个 x 元素作出贡献，则

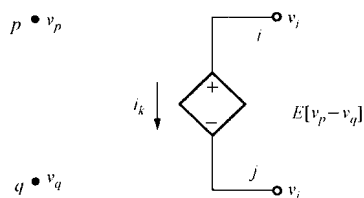


$$\left. \begin{aligned} x_{ik} &\leftarrow x_{ik} + F_k \\ x_{jk} &\leftarrow x_{jk} - F_k \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

1.2.6 电压控制电压源

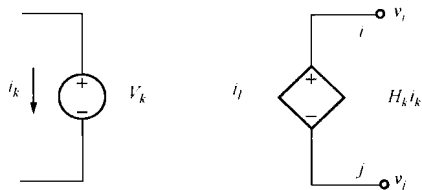
电压控制电压源的控制系数为 E ，流过此电压源的电流 I_k 是一个新的变量，它是 I 向量的一个元素。电压控制电压源将对 4 个 z 元素及两个 x 元素作贡献，同时令 V_k 为零，则

$$\left. \begin{aligned} z_{ki} &= 1, & x_{ik} &= 1, & V_k &= 0 \\ z_{kj} &= -1, & x_{jk} &= -1 \\ z_{kp} &\leftarrow z_{kp} - E \\ z_{kq} &\leftarrow z_{kq} + E \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$



1.2.7 电流控制电压源

与电流控制电流源一样，作为控制源的电压源是为测量控制电流用的，需要按上述独立电压源的方式输入，其编号为 k 。



接在节点 i 和 j 之间的受控电压源与控制电流之间的转移阻抗是 H_k 。通过此电压源的电流成了新的变量，是向量 i 的一个元素，其编号为 l 。

电流控制电压源将产生两个 z 元素和两个 x 元素、同时对一个 u 元素作出贡献，而使 V_l 为零。

$$\left. \begin{aligned} z_{ki} &= 1, & x_{il} &= 1, & u_k &\leftarrow u_k - R_l, & V_l &= 0 \\ z_{kj} &= -1, & x_{jl} &= -1 \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

1.2.8 电感和电容

电感和电容由于是储能元件，输入到改进节点方程中的情况比较复杂，分别随不同的模拟分析有不同的输入规则。

在频域分析（交流扫描）及相关的模拟分析中，整个计算都在复数域进行，电感及电容的阻抗都是复数。电感的复数阻抗是 $j2\pi fL$ ，而电容的复数阻抗是 $-j \frac{1}{2\pi fC}$ 。上述阻抗按电阻输入的方式输入。

在暂态分析中，电感及电容都是用等值电阻和电流源的组合来代表，具体的计算方式由不同的积分方式决定，1.3 节将详细介绍。

1.2.9 非线性元件

在实际电子电气电路中，大部分的电路元件是非线性元件，如二极管、三极管、MOSFET、磁元件以及复杂的电气装置等。由于它们是非线性的，其内在的电阻、电感、电容都不是常数，因此不能直接输入到改进节点法的方程中，而要通过元件模型来代表。

所谓元件模型，就是根据元件本身的物理特性推求出来的用基本电路元件组成的子电路，它们在不同的模拟分析中表达的物理关系不同，电气量之间的关系也不同，因而不同模拟分析的模型不同。而且模型植入不同的模拟器中也存在很多差别。因此，电气、电子元件模型已经发展成一门很复杂的技术，很多书籍文献都作过这方面的探讨。本章就一些基本模型的建造作简要的介绍，需要深入了解的读者可参考有关的书籍文献。

1.3 电路模拟的基本分析法

1.2 节介绍了用改进节点法表达电路以及自动生成改进节点法方程的方法。在此基础

上,讨论能作什么模拟分析和如何实现这些模拟分析。从电路分析的角度看,最主要的有以下三种分析法。

- (1) 直流分析 (DC analysis)。
- (2) 交流分析 (频域分析, AC analysis)。
- (3) 暂态分析 (时域分析, Transient analysis)。

其他的分析法都是基于这三种模拟分析方法建立的,所以首先要弄清这三种模拟分析方法。

1.3.1 直流分析

求解电路直流工作点的运算叫做直流分析。在信号放大电路中,直流工作点为大家所熟知,那就是电路带电而信号为零时的工作状态。此时电路各点的电流、电压就称为电路的直流工作点。其他电路并不一定实际存在这样意义的工作点。可以认为,模拟仿真中的直流工作点的概念是信号放大电路的直流工作点的延伸。在电路模拟仿真领域中,这样一个工作点为各种电路的分析提供了一个平台。在进行交流分析或暂态分析之前,都要进行直流分析计算,以确定非线性元件线性化的基点。因此,成功的直流分析是电路模拟仿真成功的关键。

一般来说,直流工作点是一个静态的工作点。所谓静态就是没有变化,即 di/dt , du/dt 均为零,亦即是一个平衡点。可以推知,在平衡点工作状态下,所有的电感、电容都不存在充放电,且所有电源都稳定在一个定值上。因此,在进行直流工作点计算时,电路作下列处理。

- (1) 所有电源都取定值。用户可以按自己的需要决定一个初始值,如无须特别安排程序将零点值取为初始值。
- (2) 所有的电容开路。
- (3) 所有的电感短路。

如果电路元件都是线性元件,式 (1.3) 就是一个线性方程,用高斯消去法就可解出。实际电路通常存在非线性元件,因此电路方程就是非线性方程。解算非线性方程的一般方法是采用牛顿—拉弗逊法。

整个直流分析的程序流程如图 1.2 所示。

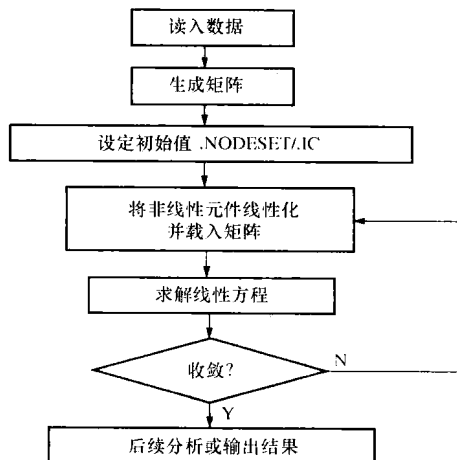


图 1.2 直流分析程序流程

1. 牛顿—拉弗逊法

多元非线性方程的一般形式为

$$f(v) = 0 \quad (1.12)$$

式中, v 为向量; f 为非线性函数。

现以一维为例,设 $I=f(v)$, 其非线性关系如图 1.3 所示。若 $I=0$, 求解 v , 即是求解非线性方程。牛顿—拉弗逊法从初始的猜测值 $v^{(0)}$ 出发, 经多次迭代求解最后得到 v 的解, 即

$$v^{(n+1)} = v^{(n)} - \frac{f(v^{(n)})}{f'(v^{(n)})} \quad (1.13)$$

从图 1.3 中可见,迭代的每一步都是围绕此步近似解的线性化,即以其导数的直线来近似非线性

曲线。

实际应用的是多维的非线性方程。此时 v 不是一个简单的变量，而是一个向量， $f'(v)$ 则是一个偏导数的矩阵，称为雅可比矩阵，用 J 表示，则

$$J = \frac{\partial}{\partial v} f(v) \quad (1.14)$$

$$v^{(n)} = v^{(n)} - J^{-1}(v^{(n)}) * f(v^{(n)}) \quad (1.15)$$

式 (1.13) 或式 (1.15) 就是所需要的迭代公式，即从上一次计算结果求下一次计算的解的方法。

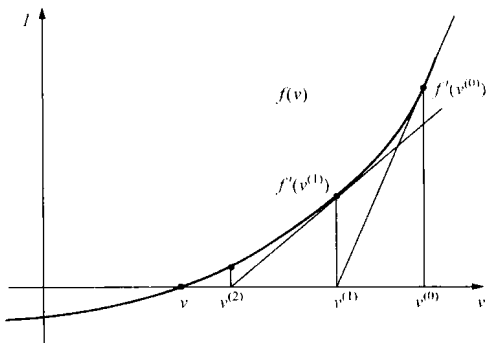


图 1.3 一维非线性方程的牛顿—拉弗逊法

总括起来，牛顿—拉弗逊法的算法就是：

- (1) 设迭代次数 $k \leftarrow 0$ ，选定 $v^{(0)}$ 。
- (2) 在 $v^{(k)}$ 上线性化 $f(v)$ ，计算雅可比矩阵 $J(v^{(k)})$ 。
- (3) 求解线性方程

$$v^{(k+1)} \leftarrow v^{(k)} - J(v^{(k)}) * f(v^{(k)})$$

- (4) $k \leftarrow k+1$ ，如尚未收敛，到 (1) 重新迭代。

理论上讲，迭代所得的近似解将不断靠近精确解，但会无穷尽地进行下去而不能达到精确解，实际上我们所需要的只是足够精确的近似解，即

$$|f(v^{(k)})| < \epsilon \quad (1.16)$$

和

$$|v^{(k+1)} - v^{(k)}| < \epsilon \quad (1.17)$$

此时迭代可以停止，所得的解就是我们要的解。从实用出发，EESIM 实际应用的收敛判据更为复杂，以达到准确的判断。这些已超出本书的讨论范围，此处不详述。

并非任何情况下牛顿—拉弗逊法都可以收敛到它的解。计算的收敛性取决于多个方面。一个是非线性函数的特性。如果其雅可比矩阵是奇异的，则计算可能发散。这点是开发元件的模型时要考虑的大问题。另一个是初值的选取。初值选得不好可能使之不收敛或收敛很慢，选取适当的初值，关系到模拟的技巧。这点在最后一章有专门的讨论。

2. 非线性元件的线性化

上面详细讨论非线性方程的解法。其关键是将非线性函数在每次迭代中线性化，具体到电路的直流分析上，就是把所有的非线性元件在每一次迭代中线性化。现在讨论怎样在电路方程中将非线性元件线性化。

下面以电路分析中最基本的重要元件二极管为例来考察这个过程。从半导体理论可知，二极管的正向特性可表达为

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (1.18)$$

式中， i_D 、 v_D 为二极管的电流和电压； I_S 、 n 、 V_T 为二极管的模型参数。

二极管非线性特性的线性化如图 1.4 所示。

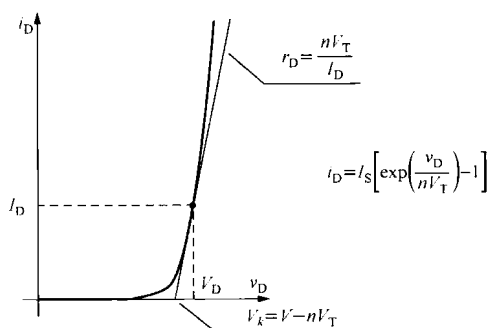


图 1.4 二极管非线性特性的线性化

考虑在某次迭代的情况, 此时的电流和电压为 I_D 和 V_D , 则

$$f'(v_D) = \frac{di_D}{dv_D} = \frac{1}{nV_T} I_S \left[\exp\left(\frac{V_D}{nV_T} - 1\right) \right] = \frac{1}{nV_T} I_D \quad (1.19)$$

对照式 (1.13) 可得

$$V_k = V_D - \frac{I_D}{f'(v_D)} = v_D - nV_T \quad (1.20)$$

令

$$r_D = \frac{1}{f'(v_D)} = \frac{nV_D}{I_D} \quad (1.21)$$

则

$$V_k = V_D - r_D I_D \quad (1.22)$$

式 (1.22) 转换为电路表达, 如图 1.5 所示。再将之转变为电流源形式, 这个等值电路就可以按上面的规则输入到电路方程中。

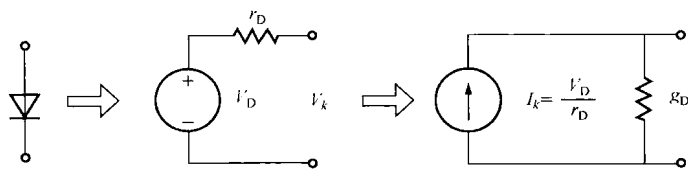


图 1.5 二极管线性化的等值电路

在这里需要非常明确的是, 上述线性化是在某次迭代中实现的, 只在该次迭代中有效, 只是二极管的模型参数不变, 即 I_S 、 V_T 及 n 不变。每次迭代都要更新 I_D 及 V_D , 因而 r_D 或 g_D 都要刷新。

三极管模型的等值电路由二极管及受控电源组成, 因此三极管的线性化问题就化为二极管的线性化问题。

其他电子元件如 MOSFET、JFET 等的非线性表达虽与二极管不同, 但其线性化的程式是相同的, 此处不一一叙述。

3. 直流分析小结

总括起来说, 直流分析是解算电路的直流工作点。直流工作状态是指电路在电容开路、电感短路、电源不变时的工作状态。求解直流工作点的基本方法是牛顿—拉弗逊法, 即将非线性元件在每次迭代中线性化求解。

有几点应在此明确:

电路的直流工作点不一定是唯一的, 在有的情况下可能是多个的, 计算可得其中的一个, 从此出发作其他分析。直流工作点不一定是稳定的, 特别是那些双态元件, 其直流状态可以是其中的任一个。

直流分析并不总是收敛的。当非线性函数的偏导数为零时 (雅可比奇异), 计算就可能是发散的; 当初值选取得不合适时, 亦可能不收敛; 在某些情况下, 还可能出现数值振荡。改善非线性元件的模型及选取合理的初值可使收敛性得到改善。

人为选定初值来改善收敛性使用“.nodeset”指令。这将在本章的后面部分讲述。

改变收敛判据有助于使计算得到一个收敛值。模拟器通常设有机制改变模拟的设置条件。另外, 半导体元件的非线性往往是以指数形式出现的, 在迭代过程中, 其指数特性可能会产生很大的数字, 以致造成数值溢出, 使计算失败。模拟器可配备自动机制来降低电源的数值, 使之一步一步地收敛。此外, 还有其他一些进一步改善收敛性的技术, 如分段线性化等, 此处不作详述。

1.3.2 交流分析

在电路分析中, 一个重要的问题是电路的频率响应如何, 或者说电路的传递函数是什么。交流分析就是为解答这个问题而设的。交流分析对电路进行小信号频域分析, 其激励信号为频域正弦信号, 因而可以使用相位法进行计算。在相位法中, 电感、电容都是复数, 电流、电压也是复数, 整个运算都在复数域进行。

在改进节点法中, 电路的动态表达的通式为

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}) \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{G}\mathbf{x} = \mathbf{w} \quad (1.23)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为电压与电流的向量; $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{G}$ 为电路信息的矩阵; $\mathbf{w}$ 为激励的向量。

在小信号的情况下, 激励 $\mathbf{w}$ 的增量产生 $\mathbf{x}$ 的增量。将方程按泰勒级数展开, 并略去高次项。采用相位法的计算, 令

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{X}_m e^{j\omega t} \quad (1.24)$$

$$\Delta\mathbf{w} = \mathbf{W}_m e^{j\omega t} \quad (1.25)$$

式中, $\mathbf{X}_m$ 、 $\mathbf{W}_m$ 都为复数向量。

得到的小信号方程为

$$\mathbf{G}e^{j\omega t} + \mathbf{C} \frac{d(\mathbf{X}_m e^{j\omega t})}{dt} = \mathbf{W}_m e^{j\omega t} \quad (1.26)$$

简化得

$$\mathbf{G}e^{j\omega t} + e^{j\omega t} \mathbf{C} j\omega \mathbf{X}_m = \mathbf{W}_m e^{j\omega t} \quad (1.27)$$

式(1.27)就是交流分析所要解的复数方程式。

在进行交流分析前, 直流分析必须完成, 以确定交流分析的基点。在进行交流分析时, 电路中所有的非线性元件即在这个直流工作点上进行线性化。需知, 因为线性化, 所有非线性引起的畸变及限幅均未计入模拟, 同时所有的时变效应亦未计入模拟。而响应是对正弦激励而言的, 整个电路的频率是统一扫描的。

了解交流分析的理论之后, 再来看看实际的做法。当电路进行交流分析时, 程序自动将电路中的电感、电容用复数输入, 这不需要用户考虑。用户需要考虑两个方面的问题: 一是激励源在何处; 二是频率扫描的范围和输出的格式。

激励源的位置就是用户考虑为输入的地方。激励源可以有多个, 但在计算中都是统一扫描的, 不可能进行混频。在进行交流扫描时, 除了直流电源之外, 所有电路中其他的时域电源都不激活。因此, 在建立仿真电路时, 频域交流激励源可以附设在其他电源上, 一般采用单位幅值、相角为零的激励源。这样, 在输出端计算所得的响应就是增益了。

交流分析的运算成功率颇高。因为非线性元件都是在同一直流工作点线性化的, 没有新