



开关电源设计与制作系列丛书

# 开关电源计算机 仿真技术

*Switchmode Power Supply Simulation*

© 陈建业 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

开关电源设计与制作系列丛书

# 开关电源计算机仿真技术

陈建业 编著

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

# 丛书序

开关电源是电源“家族”中的重要成员，是发展较快的前沿电源技术。在电源领域还有不间断电源、逆变器、变频器、交流电源、焊接电源、充电器、精密电源、工业电源、医用电源、军用电源、特种电源等，但几乎所有的电源迟早都会向开关电源靠拢。传统的电源技术正在让位于高频开关电源技术，传统应用领域逐渐被新的开关电源升级换代。新能源的开发利用又催生了绿色电能变换这一最能体现开关电源高频逆变核心技术应用的庞大的市场需求。越来越多的电源科技工作者、新电源产品的开发者、各行业传统电源产品面临升级换代的革新者都希望读到最新的有关开关电源的实用设计指导书。这正是编撰“开关电源设计与制作系列丛书”的初衷。丛书内容围绕实用设计展开，为设计者提供实用电路、关键技术、简明实用的设计方法、成功案例，将成为读者得心应手的案头书。

丛书目前包括《开关电源设计与制作基础》、《反激式开关电源原理与设计》、《开关电源设计与制作实践》、《开关电源模块化与数字化技术》、《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》、《开关电源计算机仿真技术》。计划出版的还有《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术与应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等。丛书作者均为当今知名的电源技术领域专家。

辽宁工业大学陈永真教授编著的《反激式开关电源原理与设计》和中电公司刘胜利高级工程师编著的《开关电源设计与制作实践》详解了单端变换、双正激变换、半桥变换和全桥变换等常见的几种典型开关电源电路原理、设计和制作要领，均为作者长期工程实践的总结。

开关电源的数字化控制代表了开关电源技术一个重要的发展方向，其发展前景较之传统的模拟、开关模拟混合控制有划时代的突破。上海福基公司庚雷高级工程师、北京半导体器件五厂微电子研究所李龙文高级工程师和中电公司刘胜利高级工程师共同编著的《开关电源模块化与数字化技术》中，提供的是大家较为熟悉、应用较广的 Vicor 电源模块，其他优秀的模块电源存在类似的应用问题，可以相互借鉴。书中提供的资料可将初涉该领域的工程师们引领入门。

电磁兼容工程实用技术在开关电源中的地位极其重要，但往往在设计初期被忽视。中国航天科技集团第 206 研究所杨继深研究员在《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》中，以生动的笔触进行了详尽的具有可操作性的介绍。

开关电源的现代设计离不开计算机仿真，然而借助现有的仿真软件针对开关电源的应用设计，系统而透彻的讲解并不多见。清华大学陈建业教授编著的《开关电源计算机仿真技术》能帮助读者在开关电源的计算机仿真技术方面打下坚实的基础。

《开关电源设计与制作基础》是清华大学蔡宣三教授生前遗墨，曾经在《电源世界》期刊由倪本来主编辑连载。蔡宣三教授的关于开关电源基础原理的叙述是此类文字中的经典之一。蔡宣三教授曾担任中国电源学会理事长，对我国电源技术的发展做出了重大贡献。谨以此书纪念蔡宣三教授。



在能源短缺和环境污染的今天，绿色能源向电能的转换具有重大意义。开关电源及其高频逆变核心技术在绿色能源转换中起着关键性作用。为此，丛书选编了《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术与应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等相关图书，已列入出版计划，希望能在改变人们衣食住行的绿色浪潮中推波助澜。

丛书由电能变换专家、中国电源学会副理事长、北京富来电能设备公司倪本来高级工程师担任总策划。参与丛书策划，为丛书提供资料、建议以及帮助审稿的专家还有北京信息职业技术学院路秋生教授，中国矿业大学王聪教授，工业与信息化部华北计算所王其英高级工程师，中国计量科学研究院于百江高级工程师，浙江大学吕征宇教授，北方工业大学张卫平教授，中国航天科技集团张志国研究员、张忠相研究员，中国科学院计算技术研究所张广明研究员，电子工业出版社赵丽松编审和苏颖杰编辑等。

限于水平，书中谬误难免，恳请读者斧正。

“开关电源设计与制作系列丛书”编辑委员会

2011年4月



# 前 言

电力电子技术是利用功率半导体器件的开关动作来控制电功率的流动，从而实现对电能进行变换的技术。在形形色色的电力电子装置中，开关电源是应用领域最广、结构形式最多、在用数量最大并且在一定程度上理论研究也最为深入的装置。但是，作为一个非线性时变系统，由于不能采用经典的控制理论对其进行分析和设计，给开关电源的设计带来很大的困难。随着计算机技术的发展，利用数学模型替代实际系统进行试验，以研究系统的静态特性和动态特性，即计算机仿真，正成为电子设计（EDA）自动化的一个重要组成部分。目前，在开关电源领域，开关变换器建模和分析的理论趋于成熟，工程应用也日益广泛，计算机仿真正成为开关电源设计的一个重要手段。

对于广大开关电源设计人员而言，上述理论方法与实际应用仍存在一定的距离，如何利用市场上成熟的计算机软件简单快捷地进行设计是他们的愿望。本书试图通过对电子电路设计领域应用最为广泛的 OrCAD 软件基本原理和使用方法的介绍，为读者提供一个迅速选择元件模型，并据此建立系统仿真模型的指引；同时，通过大量的仿真实例来演示如何有条不紊地对开关电源的设计问题进行分解和处理，直到得到预想的结果。

由于本书的读者对象主要是从事开关电源设计的专业技术人员和大专院校相关专业的高年级本科生及研究生，所以作者在书中尽可能避免复杂的理论推导，而以定性的方法从物理概念入手对开关电源的结构、原理和应用实例进行介绍，并侧重对于应用技术和实际电路的分析与计算。此外，作者假定读者对于开关电源的基本理论和技术已经有所了解，所以将讨论的重点放在开关电源设计的专门技术上。

本书内容由 5 章组成，第 1、2 章介绍计算机仿真的背景知识，其中第 1 章介绍有关计算机仿真的基本概念和方法以及采用计算机辅助设计（CAD）的必要性，第 2 章介绍在电子电路设计中应用最为广泛的 OrCAD/PSpice 软件的基本结构和使用方法；第 3、4 章主要讨论开关电源的两个主要部件，即开关器件（第 3 章）和磁性元件（第 4 章）的元件级建模方法，并给出了相应的应用实例；第 5 章从装置和系统的角度讨论开关电源的计算机辅助设计方法，并介绍几种常用的仿真软件，包括在线和离线的使用方法。

本书各章均采用由浅入深的方式逐步展开，以大量的实例将理论与实际应用紧密结合，并在可能的地方都尽可能对过去的经验和现在的发展加以适当的介绍，以供读者对整个开关电源计算机辅助设计有尽可能全面和深入的了解。衷心希望本书能对读者在开关电源的设计方面有所帮助。

为便于读者查看，本书中的电路模型、仿真电路图及仿真结果等均为软件原图，图中的部分元器件符号不符合国家标准，编辑时未做规范，特此说明。

由于作者的水平有限，书中难免有错误和不当之处，欢迎读者批评指正。

编著者

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 基本概念 .....	1
1.3 系统建模 .....	3
1.4 数学仿真 .....	4
1.5 仿真工具 .....	10
第 2 章 仿真软件 OrCAD/PSpice .....	13
2.1 OrCAD/PSpice 的发展历史及其特点 .....	13
2.2 OrCAD 仿真软件的主要模块 .....	14
2.2.1 OrCAD CAPTURE CIS——电路原理图设计模块 .....	15
2.2.2 PSpice A/D——数模混合电路仿真器 .....	19
2.3 OrCAD/PSpice 在电力电子电路仿真中的局限 .....	27
2.4 OrCAD 在仿真中的收敛性 .....	28
第 3 章 开关电源器件的建模 .....	39
3.1 电学模型 .....	39
3.1.1 基本模型 .....	39
3.1.2 模型性能扩展 .....	42
3.2 子电路模型 (Subcircuit) .....	48
3.3 第三方模型 .....	62
第 4 章 磁性元件的计算机辅助设计 .....	67
4.1 PSpice 磁性元件设计 .....	67
4.1.1 耦合电感和磁性元件 .....	67
4.1.2 变压器模型 .....	73
4.2 磁性元件编辑器 .....	87
4.2.1 设计步骤 .....	88
4.2.2 MPE 模型在 PSpice 中的应用 .....	102
4.2.3 利用 Capture 符号与模型联合 .....	107
第 5 章 开关电源建模 .....	118
5.1 DC-DC 变换器主电路的建模 .....	118
5.2 开关电源控制电路的建模与仿真 .....	134
5.3 功率因数校正技术 .....	142

5.3.1 无源校正技术 .....	145
5.3.2 基于单个开关器件的功率因数校正技术 .....	154
5.4 专用仿真软件 .....	168
5.5 开关电源的在线设计 .....	185
参考文献 .....	197

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

目前，人类所使用电能的 75% 须经过电能变换，在 21 世纪这个比例将达到 90% 以上。

一个典型的电能变换系统通常是由电力电子器件构成的开关电源装置、由模拟电路或数字电路（如计算机）构成的控制电路和由电动机或其他机电设备构成的负荷三部分组合而成。这样一个复杂的非线性的数模混合系统，再加上各个部分往往又遵循不同的物理法则，其设计和分析均存在巨大的困难。而计算机硬件和软件技术的发展，使得只要用户能建立适当而精确的电路模型，就可以利用已知的电路理论和计算方法，在计算机上利用软件建立一个虚拟的电路模型，并对其进行大量且迅速的计算，“仿真”出接近真实的电路结果。利用“软件面包板”的形式对电路设计进行验证的方法可以克服硬件试验方法所面临的困难，使得设计人员可以将更多精力集中在设计层面，从而大大节省产品开发的费用和缩短开发周期，因此得到电路设计工程师日益广泛的应用。近年来，电子电路设计自动化（EDA，Electronic Design Automation）已经渗入到电子电路设计的各个领域，如原理图设计、逻辑或模拟电路仿真、设计优化、最坏条件分析和印制电路板设计等。电力电子电路的 EDA 工具也得到了长足的发展。此类工具主要包括三种：第一种是在传统的电子电路设计软件中，通过引入新的电力电子器件模型将其应用领域扩展到电力电子系统的设计中，如为我国电路设计人员所熟知的 OrCAD/PSpice；第二种是专用领域的仿真软件，如控制系统仿真软件 MATLAB 中加入以理想开关模型为代表的电力电子器件模型，从而使其在原有研究领域中对包括电力电子装置的问题时仍可进行有效的仿真；第三种是新开发的电力电子系统专用仿真软件，如以开关电源设计为目的的 SIMPLIS 等。总之，在对电力电子系统的开发设计中，计算机仿真已经成为电路设计人员的一个基本手段。

## 1.2 基本概念

下面介绍计算机仿真的几个基本概念。

### （1）仿真

仿真指的是利用模型复现实际系统中发生的本质过程，并通过对上述模型的实验来研究已存在的或计划中的系统。换句话说，仿真就是利用模型对实际系统进行实验研究的过程。这就涉及两个基本概念，即“系统”和“模型”。

### （2）系统

系统一词最早见于著名古希腊原子论创始人德谟克里特的著作《世界大系统》，是指具有某些特点功能，按照某些规律结合起来，相互作用、互相依存的所有实体的集合或总和。



系统具有两个基本特征：整体性和相关性，即系统内各个部分是不可分割的，它们相互之间以一定的规律联系，它们的特点关系形成了具有特定功能的系统，按照系统的物理特征分为工程系统和非工程系统，常见的电气、化学、热学、机械等系统都属于工程系统，而社会、经济、交通、生态等系统则属于非工程系统。按照状态变量是否连续分为连续系统、离散系统和连续/离散混合系统。连续系统又包括集总参数系统和分布参数系统，离散系统包括离散时间系统和离散事件系统，混合系统则是由连续系统和离散时间系统组成。虽然上述物理系统从性质上看千差万别，但其具有一个共同的特性，即均可以用微分方程来加以描述，这体现了客观世界的统一性。

### (3) 模型

模型是对实际系统的一种抽象，是对系统本质的描述，是人们对客观世界反复认识、分析，经过多级转换、整合等过程而形成的最终结果。模型具有与实际系统相似的数学描述或物理属性，可以各种直观的形式给出所研究系统的有用信息。

在实际应用中，根据模型和原型系统的关系可将模型分为如下几类：

① 形象模型：保留原型的外观特征，仅对实际系统的规模进行放大或缩小。

② 模拟模型：又称类比模型，它根据描述不同物理系统（力学、电学、热学等）的物理规律之间的相似性，建立物理意义完全不同的模型。

③ 符号模型：借助文字、字母、符号、图表或数学表达式来描述实际系统的模型。其中，利用数学表达式来描述现实系统的模型称为数学模型。

仿真的概念在其发展过程中不断演变，但无论哪种定义，仿真基于模型这一基本观点都是一致的：仿真就是通过对模型的实验达到研究系统的目的。系统仿真是以相似性原理、系统技术、信息技术及应用领域的相关专业技术为基础，以计算机、仿真器和各种专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实的或设想的系统进行动态研究的一门多学科的综合技术。

### (4) 仿真过程

根据上述定义，计算机仿真可以分为两个过程。

#### ① 建模

建模是根据研究对象的基本物理规律，对物理系统写出描述其运动规律的数学方程，即数学模型的过程。模型的建立是系统仿真的基础，其本质是依据系统之间的相似性原理，在一对系统之间建立一种对应关系，从而可利用模型系统对实际系统进行研究。

由于实际系统十分复杂，往往不可能对其做出无所不包的全部描述。实际系统往往是多方面的，如电力电子器件本身的特性就包括其电特性、热特性及机械特性等不同的方面，对由其构成的系统进行研究时既没有必要也不可能建立一个包括上述全部特性的统一的模型，而往往是根据所研究的问题建立相应的某一方面的模型。实际系统又是多层次的，如开关电源中可能包括以数百毫秒为周期的输出回路的调节过程，微秒以至纳秒级的电力电子器件开关和杂散参数的过渡过程，这样一个大时标跨度的系统，在数学上对应的是一个病态的方程，会导致求解过程中的数值稳定性问题。

实际上，对于同一个系统从不同角度观察会产生各不相同的概念，在数学上也会产生互不相同的描述方法。虽然最理想的是建立符合所有目的的数学模型，但实际中很少有人去研究这类问题，因为此类模型可能过于复杂而难以求解，特别是对于通常关心的特定领域和特定时间的问题而言，其他现象与其之间很可能是弱相关的，可以忽略不计。比如当研究开关电源的暂态过程时，由于输出回路的时间常数很大，完全可以近似认为在一个开关周期中



输出电压保持不变,从而简化模型。所以,在建模过程中重要的是记住数学模型所代表的数学系统只是实际系统在概念轴上的投影,建模的本质在于将所研究的系统投影到适当的概念轴。换句话说,所建立的数学模型,实际上只是根据研究目的确定的、关于系统某一方面本质属性的抽象描述。

## ② 实验

仿真的过程即是利用模型对系统方程进行求解,即实验的过程。对于数学仿真而言,其过程就是利用适当的程序语言将所研究的物理系统的数学模型编制成的程序,并向其输入不同的条件进行计算的过程。

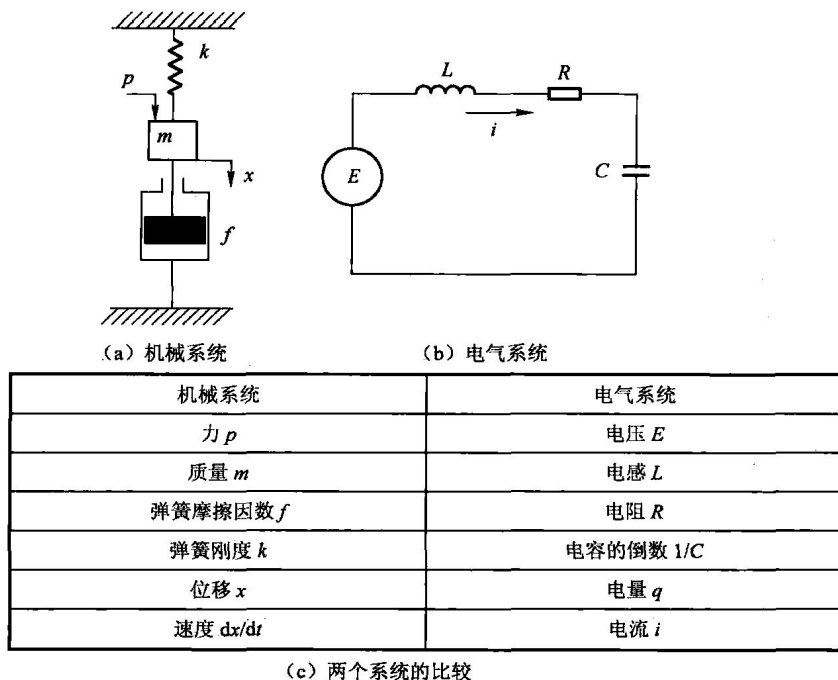
仿真与通常的数值计算之间的根本区别在于它首先是作为一种实验技术,利用所建的模型在给定条件下使程序运行的过程。另外,它通常用于不能得到其解析解的复杂系统的研究。

综上所述,仿真通常指的是利用虚拟模型对所研究的系统进行实验,即研究人员根据所研究系统的物理规律建立该系统的数学模型,然后通过输入各种不同条件来预测系统的特性和外部作用的影响,进而研究系统的结构和控制策略,并据此优化设计。这正是电力电子系统设计人员所希望学习和掌握的方法,也是本书所介绍的内容。

## 1.3 系统建模

模型的建立是系统仿真的基础,其本质是依据系统之间的相似性原理,在一对系统之间建立一种对应的关系,从而可以利用模型系统对实际系统进行研究。

为了说明上述概念,首先对相似性和相似系统加以说明。图 1-1 所示为一个由质块、弹簧和阻尼器组成的机械系统和一个由电阻、电感和电容组成的电气系统。



(c) 两个系统的比较

图 1-1 机械系统和电气系统的相似性



描述上述两个系统的微分方程分别为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + kx = p \quad (1-1)$$

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E, \quad i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

显然，二者具有相似的数学描述，并且在参数上存在一一对应的关系，相应地，两者的响应也具有相似的振荡特性。可以设想，假如比例尺选择适当，利用电气系统进行实验的结果和利用机械系统进行实验的结果在数值上将完全相同，因此可将电气系统看做机械系统的一个模型。实际上，当描述两个不同动态系统的微分方程具有相似的形式时，这两个系统就互为相似系统；而在微分方程中占据相同位置的物理量，称为相似量。相似系统的概念在实践中十分有用，因为在研究不同类型的系统时，一种系统（如电气系统）可能比另一种系统更容易通过实验进行研究，所以可以通过建立和研究一个与作为研究对象的复杂系统（如机械系统）相似的电气模拟系统来代替对机械系统的制作和研究。同样，一个数字系统往往比一个电气系统更便于研究，所以可根据电气系统的物理特性，建立描述其特性的数学方程，即数学模型，从而将一个电气系统的问题利用数学方法进行研究。因此，一个系统可以用其相似模型在某种意义上加以近似，这是整个系统仿真实论的基础。实际应用中，由于系统多为非线性系统，所以相似性的成立是有条件的。对于宽范围的相似研究，往往需划分为若干个子区间分别建立相似系统来进行。

数学建模即是根据研究对象的基本物理规律，写出描述其运动规律的数学方程，即数学模型，从而在物理系统和其抽象的数学描述之间建立起对应关系的过程。这种关系的建立大致可以分为五个步骤：

① 系统分解。如前所述，针对所研究的问题对系统进行层次分解，抽取研究对象中与研究目的相关的物理规律，即对模型加以简化，建立所谓的集总模型。

② 数学建模。根据集总模型的物理规律建立系统的数学模型，即抽象为相应的数学方程——微分方程组或差分方程组。

③ 模型转换。由于计算机数字仿真的实现依赖于程序的运行，因此需将模型的数学描述变换为相应的计算机程序或排版板上的结构，即是编程过程。

④ 参数估计。根据实际系统决定方程中未确定的系数。

⑤ 可信度检验。通过仿真实验的结果与实际系统的对比来验证模型的正确性。

应当指出的是，上述过程是一个十分复杂的过程，并没有一个固定的程式可以遵循。更有人指出，建模是一门艺术，是逻辑、直觉、抽象、联想与技艺的融合。

## 1.4 数学仿真

数学仿真是以数学模型与实际物理系统之间的相似性为基础的仿真，其主要特点在于利用数学模型代替实际系统进行实验，以研究实际系统的静动态特性。它的主要优点在于它完全建立在软件基础之上，从而可以在产品生成之前即对其进行评估，便于早期发现设计缺陷，提高效率；可以根据研究对象的不同随时对模型加以变动，而不像物理模拟那样需对硬件加以改动，因而经济快捷；可以对电路在最坏情况、最恶劣条件以及故障状态下的性能进





行评估,从而提高产品的安全性。但是相对于利用按比例缩小的模型进行的物理模拟而言,由于其模型的正确性依赖于对物理规律的把握和抽象的准确性以及计算机的计算能力,所以其可信度受到一定的限制。数学仿真的基本前提在于任何一个动态系统从根本上来说均可以由状态方程——微分方程组来描述的。由于微分方程组均可以利用积分的方法求解,所以解决上述问题的核心就是解决积分计算问题。

随着计算机技术的发展,数字计算机已经成为计算与仿真的基本工具。由于计算机的变量表现为离散的形式,所有连续的数学计算必须转换为离散形式才能进行,所以数字仿真模型的建立首先是将数学模型离散化,然后根据数值计算方法,将模型的运算编制成计算机所能识别的程序的过程。这里所谓的数值方法,即是求作为系统模型的微分方程在一系列离散的时间点  $t_0, t_1, \dots, t_n$  上的近似解  $X_0, X_1, \dots, X_n$ , 其本质即是利用差分方程的解来近似微分方程的解。

图 1-2 给出了利用仿真软件进行时域分析的一般步骤和基本方法。

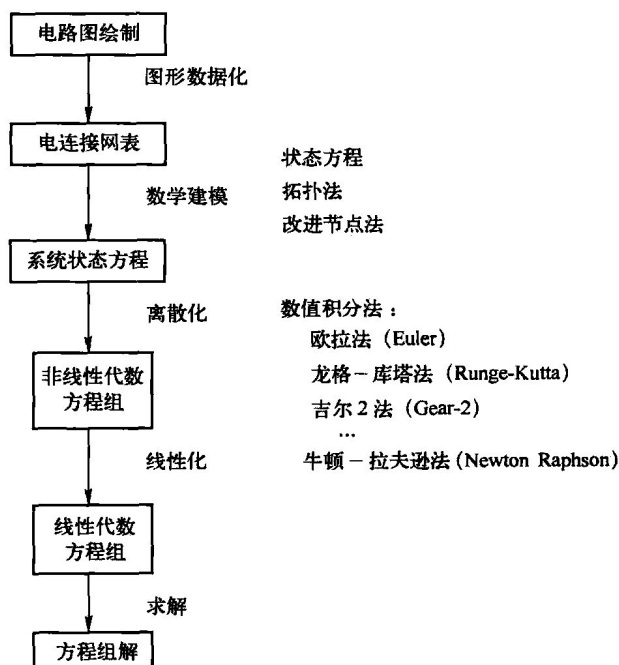


图 1-2 时域分析的一般步骤和基本方法

图 1-2 中的步骤可以说明如下。

#### (1) 图形数据化

电连接网表是连接电路原理图和仿真软件之间的桥梁,只有将电路原理图翻译成仿真程序可以识别的电路中所有元器件性能和相互之间连接关系的文件,才能作为仿真软件的输入被调用。

#### (2) 数学建模

作为建模的方法,主要采用状态方程法、改进节点法和拓扑法。

#### (3) 离散化

为了利用数字计算机对连续系统进行求解,必须将所建立的描述系统的微分方程组利



用数值积分方法进行离散化。表 1-1 中给出了几种典型的数值积分方法的计算公式。下面对在计算机仿真软件中经常应用的欧拉法、龙格-库塔法和梯形法的基本原理做一简单介绍。

表 1-1 典型的数值积分方法的计算公式和特征

名称	计算公式	特征
FE: 向前欧拉法	$X_{n+1} = X_n + hX'_n$	显式, 1 步, 1 阶
RK: 龙格-库塔法	$X_{n+1} = X_n + hX'_n + h^2X''_n/2! + h^3X^{(3)}/3! + h^4X^{(4)}/4!$	显式, 4 步, 4 阶
BE: 向后欧拉法	$X_{n+1} = X_n + hX'_{n+1}$	隐式, 1 步, 1 阶
TR: 梯形法	$X_{n+1} = X_n + h/2(X'_n + X'_{n+1})$	隐式, 1 步, 2 阶
G2: 吉尔 2 法	$X_{n+1} = (4X_n - X_{n-1} + 2hX'_{n+1})/3$	隐式, 2 步, 2 阶

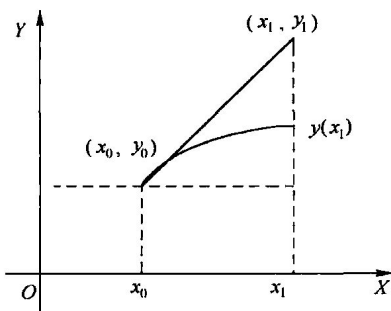


图 1-3 欧拉法的基本原理

### ① 欧拉法

欧拉法又称折线法, 其基本原理如图 1-3 所示。

假定描述系统的状态方程用微分方程  $y' = f(x, y)$  描述, 则由  $(x_0, y_0)$  出发, 代入右函数  $f(x, y)$  得到  $y=y(x)$  在  $(x_0, y_0)$  切线的斜率。以该斜率经  $(x_0, y_0)$  作切线与  $X = x_1$  相交于  $y_1$ 。当步长  $\Delta h = x_1 - x_0$  较小时, 即可以近似地以  $y_1$  作为  $y(x_1)$  近似值得到

$$y_1 = y_0 + hf(x_0, y_0) \quad (1-3)$$

这种方法中, 由于求解  $y_{n+1}$  的值仅需了解  $y_n$  的值, 故称为单步法。由于算法简单, 所以计算速度快, 但计算精度不高, 特别是其数值稳定性不好。由于其解依赖于前一个点的值, 故各步的舍入误差有可能会恶性传播, 使得后面的误差越来越大, 所以这种向前欧拉法在仿真软件中通常不用。但由于其计算简单、物理概念明确, 所以对于理解数值积分方法的基本原理是十分重要的。

### ② 龙格-库塔 (R-K) 法

为了减轻计算时对前一个点的计算值的依赖性和提高计算精度, 一个可行的方法就是利用多步法, 即在每一步计算时利用前面若干个点的值的线性组合, 即

$$y_{k+1} = y_k + \sum_{i=1}^N \omega_i k_i \quad (1-4)$$

这种方法的基本思想是基于泰勒展开式, 即

$$y(t+T) = y(t) + T\dot{y}(t) + \frac{1}{2!}T^2\ddot{y}(t) + \frac{1}{3!}T^3\dddot{y}(t) + \dots \quad (1-5)$$

引入的截断误差为  $\varepsilon_n = \frac{1}{n!}T^n y^{(n)}(t) + \dots$ , 截断误差的阶次  $n$  越高, 计算结果越精确。采用线性内插的方法增加计算次数, 求出等效斜率是 R-K 法的基本思路, 其中最常用的是四阶 R-K 法, 即

$$y_{k+1} = y_k + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (1-6)$$

式中,  $k_1 = hf(x_k, y_k)$ ;  $k_2 = hf(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{k_1}{2})$ ;  $k_3 = hf(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{k_2}{2})$ ;  $k_4 = hf(x_k + h, y_k + k_3)$ 。



这种方法的精度比欧拉法高，同时具有较高的稳定性，并可自行启动，因此广泛应用于系统仿真软件中。但它要求所求解的函数一阶以上的导数连续，而欧拉法则没有该要求；同时由于每一积分步需要进行4次右函数计算，所以计算量约为欧拉法的4倍。实际上，这两种方法均是基于在初值附近展开泰勒级数的原理，所不同的是取多少项，欧拉法仅取2项，四阶龙格-库塔(R-K4)法取前5项。随着取的项增多，计算精度增高；但计算公式随之变得复杂，计算工作量增大。实际中采用哪种方法需根据问题需要选择。

### ③ 梯形法

$k=2$ 的隐式Adams方法称为梯形法。虽然它的仿真精度不如R-K4法高，但对于任意大的仿真步长，由梯形法建立的数字仿真模型具有与原系统相同的稳定性品质，因此在很多仿真软件(如PSCAD/EMTDC)中得到了广泛应用。

梯形法的计算公式为

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, y_{n+1})] \quad (1-7)$$

梯形法是隐式的，可用迭代法进行求解。利用欧拉法提供迭代初值，梯形法的迭代公式为

$$\begin{cases} y_{n+1}^{(0)} = y_n + hf(x_n, y_n) \\ y_{n+1}^{(k+1)} = y_n + \frac{h}{2} [f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, y_{n+1}^{(k)})] \end{cases} \quad (1-8)$$

为了控制计算量，通常只迭代一两次就转入下一步的计算。

直接使用梯形法的一个很大缺点是收敛速度慢。为了提高收敛速度，可以采用复化梯形法、辛普森法或外推加速法，有兴趣的读者可阅读参考文献[6]。

数值积分法除了存在上述单步与多步的区别外，实际计算中根据 $y_{k+1}$ 的求解算式中是否隐含其本身又分为显式和隐式两种方法。其中，显式方法由于直接计算，每步计算次数少，易于编程，但在求解病态方程时，稳定性差，必须用很小的步长；隐式方法则通过迭代方式求解，可以改善截断误差，稳定性好，对于病态方程求解可用较大步长，但每步计算次数多。

表1-2列出了电力电子技术常用仿真软件及其特点。可以看到，隐式算法中的梯形法由于容易计算、数值稳定性好，同时具有适当的精度，在电路仿真软件中得到最广泛的应用，而除了向前欧拉法外，其他方法均在仿真软件中得到应用。

表1-2 电力电子技术常用仿真软件及其特点

仿真器	P	SPICE	SABER	SIMPLIS	SCAT	Simplorer	PSIM	MATLAB
数值积分法	梯形法	梯形法 (默认) GEAR	GEAR(默认) 梯形法	转移矩阵的 泰勒级数近似	梯形法	梯形法和欧 拉法	梯形法	R-K法 (默认)
电路的建模	节点分析	改进节点 法	改进节点法	状态变量分 析	状态变量 分析	状态变量分 析	节点分 析	状态变量 分析
计算步长	固定步长 (用户指定)	可变步长 (自动)	可变步长(自 动)和固定步长	可变步长 (自动)	可变步长 (自动)	可变步长 (自动)	固定步 长(自动)	固定步长 或可变步长



续表

仿真器	P	SPICE	SABER	SIMPLIS	SCAT	Simplorer	PSIM	MATLAB
开关模型	理想开关	理想开关和详细器件模型	理想开关和详细器件模型	理想开关(双电阻模型)	理想开关(双电阻模型)	理想开关(双电阻模型)	理想开关(双电阻模型)	可变电阻+串联电感
开关时刻的确定	零点校正(具有插值功能)	通过对计算误差的判断调整步长	对过零点前后值插值,其后返回再次计算	根据前后值进行插值	通过牛顿法和二分法计算状态变化时刻	根据前后值进行插值	零点校正	不明
开发的目的	系统扰动分析	集成电路设计	系统设计	开关电源设计	开关电源设计	通用电路仿真软件	电力电子电路	控制系统设计
主要应用	包括电机和系统的电力电子系统分析	包括详细器件模型的电力电子电路分析	电气系统和机械系统和热力系统综合分析	开关电源分析	开关电源分析	电力电子电路分析	电力电子电路分析	控制系统设计与分析
其他	各种不同版本共存,包括研究开关理论的GIFU开关	具有大量用户具有功率器件模型	利用MAST语言建模具有与SPICE通用的器件库	具有周期性定常状态分析功能并可于该点进行频域分析	具有周期性定常状态分析功能	可以利用电路、框图和状态图进行仿真	具有电力电子元件和电路模型	具有包括器件理想开关模型的Sim Power System

作为电力电子电路中周期性开关过程所引起的系统状态的突变在数值计算中会带来如下问题:

- 陷入步长选择的两难境地,如果采用定步长计算可能会导致计算误差的积累;而采用变步长算法一方面周期性地状态变量的突变将导致大量的计算时间被用来寻找适当的步长,另一方面也可能导致过小的计算步长,总之增大仿真计算所需的时间。
- 由于算法不收敛引起计算的终止。
- 由于数值积分方法的原因引起开关动作时刻的数值振荡。

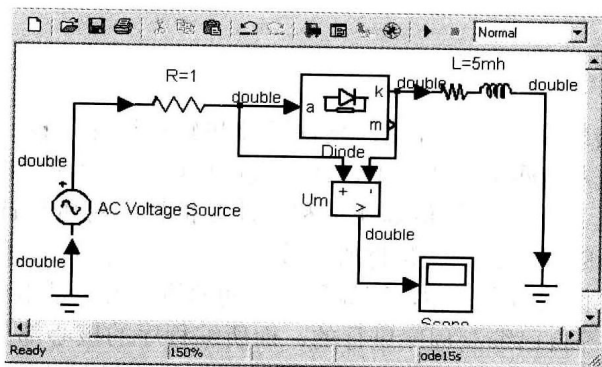
为了解决上述问题,日本电气学会报告中指出:

- 可以通过在开关器件两端引入专门为改善计算稳定性所用的吸收回路(数字吸收回路)并适当调整计算步长来改善计算稳定性。
- 引入插值算法。电力电子器件开关时刻状态变量会发生突变,而仿真结果却是通过在一系列离散时刻求解网络方程实现的,假定电力电子器件开关时刻与计算时刻不重合,将可能导致较大的计算误差。利用插值的方法可以有效地消除由于算法所引起的振荡。

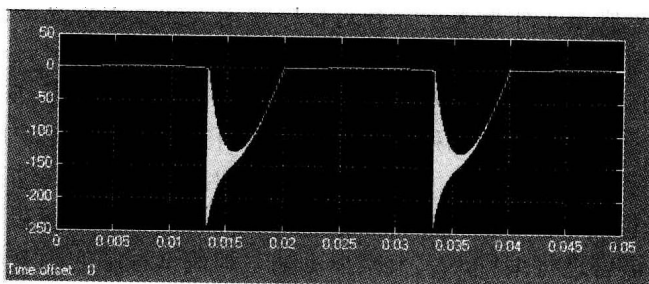
图 1-4 (a) 给出了利用 MATLAB 构成的简单二极管整流电路,输入电压的有效值为 100V,频率为 50Hz,采用变步长算法。当二极管吸收电路参数不恰当时,关断过程出现强烈的振荡,如图 1-4 (b) 所示。上述振荡虽然部分是由于关断过程引起的,但更多的是由于数值算法造成的。加以适当的数值吸收回路之后振荡明显消除如图 1-4 (c) 所示。对比图 1-4 (d) 所示在没有吸收回路条件下采用详细器件模型的 OrCAD 的仿真结果,可以知道,对于采用理想开关模型的仿真软件中开关过程出现的振荡进行分析时应当十分谨慎。实际上,不应当用理想开关模型来分析电力电子电路的开关过程。

#### (4) 线性化

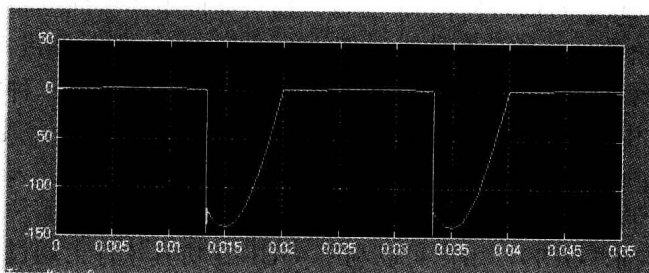
由于利用数值积分方法对系统状态方程进行离散化所得到的方程往往是非线性的代数方程方程组,而为了求解必须转换为线性的代数方程组。电路仿真通常是利用牛顿-拉夫逊(Newton Raphson)等方法进行上述转换。



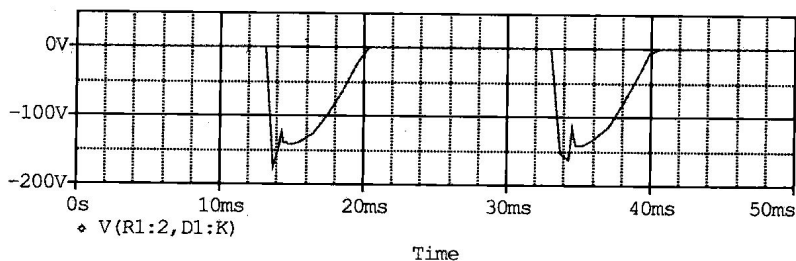
(a) 利用 MATLAB 构成的简单二极管整流电路



(b) 吸收回路参数不恰当时二极管两端电压



(c) 采用适当数值吸收回路后的电压波形



(d) OrCAD 仿真结果

图 1-4 引入插值算法的例子

(5) 求解

CAD 中数值计算的最后一步是利用高斯消去法和 LU 分解或其他方法对生成的线性代数方程组进行求解，从而完成数字仿真的整个过程。



## 1.5 仿真工具

电子系统设计在传统上有两个分支：硬件设计和软件设计，设计人员也因此而分为硬件设计人员和软件设计人员两类。传统上，计算机仿真作为计算机辅助设计的一个组成部分属于软件设计的范畴。由于计算机仿真就是利用计算机程序对所设计的系统进行实验的过程，因此软件设计人员的任务首先就是将所建数学模型借助适当的软件工具转换为在一定软件环境下计算机可以操作的仿真模型，即编程。早期的仿真大多是用户利用通用的程序设计语言，如 Fortran、C 等自己编制程序进行的，而所编程序的核心部分就是上述数值解法。这种方法的一个明显优点是，由于程序使用人同时往往是编制人，所以应用上灵活，便于根据需要随时改动；缺点则是工作量大，并且对程序使用人的要求较高，而且随着研究对象的日益复杂，编程工作就变得十分困难。

随着计算机技术的发展和所研究对象的日益复杂化，自 20 世纪 50 年代开始，出现了一些专门设计的各种通用或专用的编程语言。最初的研究重点是将用户所熟悉的模拟计算机的编程方法移植到数字仿真中，推出了一系列具有框图描述功能的连续系统仿真语言，如早期的 CSSL 和当前流行的 MATLAB 等。这些语言允许用户以更方便和直接的方式将问题公式化，并以更简洁的语言进行编程，大大减少了编写和调试程序的困难和时间，加快了仿真的速度。但由于仿真软件本身的局限，仿真的结果通常仍需通过硬件设计人员的再设计，即根据系统要求，细化电路设计，进行功能调试，最后完成电路原理图和印制板的设计。而相应的硬件电路 CAD 软件，如 Tango 等也仅是解决了电路设计和印制板布线自动化的问题。

近年来，随着计算机技术的发展和人机交互性的改善，出现了一种完全新型的 CAD 语言，即所谓硬件描述语言 HDL (Hardware Description Language, 也称电路描述语言)。其基本思路在于将实际应用的硬件与程序库中的模型之间建立一一对应的关系，从而可以不借助于中间的函数关系，直接建立系统模型。特别是随着计算机人机界面技术的进展，通过在软件中引入图形用户界面 (GUI)，用户可以利用 GUI 在仿真软件上通过绘制电路图来直接建立数学模型。

利用该类语言进行设计的基本特点在于采用自上而下 (Top-down) 的设计方法，直接面向用户需要，首先从整体出发，根据所研究系统的行为和功能要求，利用数学模型进行行为描述，并通过系统行为描述的仿真来发现设计中的问题。此时，设计人员并不考虑实际的操作与算法实现，而仅研究所设计的系统结构及工作过程能否能达到系统设计的要求。在功能设计完成之后再转入具体的电路实现，即通过选择适当的电路和器件实现电路设计。由于此时利用软件模型所进行的原理图设计和利用硬件面包板进行实际的组装是一致的，所以使用人无需具有深入的计算机知识即可进行操作，有效地简化了仿真过程。而采用软件面包板的方法对电路进行分析研究不仅可以大大地节约硬件开发费用，还可缩短系统的开发时间，从而为电路仿真的推广应用提供了有利的条件。

这种设计理念将每一步的设计均与仿真结合，可以尽早发现设计问题，因此日益得到电路设计人员的重视和应用。在数字电路设计领域，常用的硬件描述语言包括 VHDL、Viewlogic、Verilog HDL 和 Altera 公司的 AHDL 等。由于这些语言具有可以多层次描述硬件电路的功能，而国际上越来越多的电子设计自动化 (EDA) 软件都接受上述 HDL 语言作为设计输入，完成从系统的高层次行为描述到直接生成 ASIC 器件的全面设计功能，所以得