

电路和系统 的仿真实践

张占松 孙时生 伍言真 编著

702

37

科学出版社

电路和系统的仿真实践

张占松 孙时生 伍言真 编著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书介绍了目前国内外电气技术工作者广泛使用的 PSPICE (画图输入) 和 MATLAB (编程输入) 两种仿真方法, 并通过大量实例说明各类电路的仿真方法. 在对线性和非线性电路、模拟电路和开关电路、控制电路和功率电路进行仿真时此类方法将有指导和帮助作用.

本书内容深入浅出、实用性强、实例多. 它既可供高等学校电类专业师生教学培训使用, 也可供厂、企、院、所从事开发、设计电器设备和系统的技术人员参考.

图书在版编目 (CIP) 数据

电路和系统的仿真实践/张占松等编著. - 北京: 科学出版社, 2000

ISBN 7-03-007822-5

I. 电… II. 张… III. 电子电路-设计-仿真 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 36697 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

北 京 双 青 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2000 年 1 月第一次印刷 印张: 10

印数: 1-3 000 字数: 227 000

定价: 18.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(环伟))

前 言

近几年,越来越多的人对计算机仿真的实用效果表示赞赏.这是因为电气系统工程规模日益庞大,线路日益复杂,而设计研制的期限却日益缩短的缘故.电气技术人员逐渐体会到购买元器件动手实验之前应先做一下仿真,即仿真成了设计的第一步.因而,为设计服务的各式各样软件犹如雨后春笋般地大量涌现出来,其中好的软件不胫而走,广为流传.由美国 Microsim 公司开发的 PSPICE 软件相信大家不会感到陌生. PSPICE 程序 3.00 以后版本用 C 语言改写, 4.00 以后版本可以解决有数字电路与模拟电路相混合的电路仿真, 5.00 以后的版本在 Windows 环境下运行. PSPICE 软件的输入基本上有网单文件和电路原理图两种形式. 电路图输入的形式有比较容易掌握、比较直观的优点,能打破网单输入“仿真”的“困惑感”和“神秘感”,因而更受众人的青睐.

本书介绍时不使用手册式的直陈方式,而以循序渐进、深入浅出、结合实例的方式介绍这一功能强大的软件.另外考虑到近年发展的符号仿真法能得到一般方法得不到的纹波的解析解,而且应用 Matlab 软件编程有强大的解矩阵功能,程序编写也不困难,因此在第四、五章介绍了用 Matlab 进行符号仿真的方法.主要是结合四种基本电路进行介绍,并给出了具体可直接使用的程序包.本书主要章次内容简介如下:

第一章 简介仿真基础、仿真概念、发展过程及其在几种基本电路中的应用.

第二、三章 详细介绍各种开关电源和各种电力电子线路的仿真方法.

第四、五章 介绍符号仿真法,以及 Matlab 软件在 Buck, Boost 等四种基本电路上的应用,并得到纹波电压的解析解.

本书第一章由张占松执笔,第二、三章由孙时生执笔,第四、五章由伍言真执笔,全书由张占松进行规划、组织、修改和审定.本书的编写工作一直得到广东省电源学会的直接指导,也受到中国电源学会的关怀,在出版费用上得到了广东工业大学电工系、教务处、自动化重点学科和罗定市无线电厂有限公司的支持.在此特表谢意!

尽管作者写作态度严肃、认真,但由于水平和时间所限,疏漏和不当之处在所难免,敬希读者批评指正.

作者

1998 年 9 月 9 日于广州

目 录

第一章 PC 机仿真基础	1
1.1 概述	1
1.2 电路仿真分析(建模)常用软件	3
1.3 从编程输入到交互绘图输入	4
1.4 从 Pspice 到 Design Center 所加的新软件	4
1.5 Design Center 的安装	5
1.6 Design Center 环境的介绍	5
1.7 电力电子仿真理论的发展概况	6
1.8 PSPICE 的基本功能	9
1.9 单管放大器的仿真	13
1.10 线性串联稳压电源仿真	16
1.11 数字电路仿真	17
第二章 DC-DC 变换器及开关稳压电源的 PC 机仿真	19
2.1 概述	19
2.2 降压式和升压式 DC-DC 变换器的仿真	19
2.3 降-升压式和升-降压式 DC-DC 变换器的仿真	25
2.4 反、正激式 DC-DC 变换器的仿真	33
2.5 半桥、全桥及推挽式 DC-DC 变换器的仿真	39
2.6 谐振式 DC-DC 变换器的仿真	50
2.7 具有反馈系统的脉宽调制开关稳压电源的仿真	61
第三章 电力电子电路的 PC 机仿真	65
3.1 概述	65
3.2 半波整流电路的仿真	65
3.3 各种全波整流电路的仿真	70
3.4 各种倍压整流电路的仿真	77
3.5 桥式整流电路的仿真	82
3.6 三相整流电路的仿真	86
3.7 各种可控整流电路的仿真	90
3.8 各种逆变电路的仿真	98
3.9 斩波器电路的仿真	107
3.10 各种交流-交流变换电路的仿真	109
第四章 DC-DC 开关变换器开环建模及符号分析	115
4.1 PWM 型 DC-DC 开关变换器的统一建模	115
4.2 PWM 型 DC-DC 开关变换器的统一数学描述	116
4.3 PWM 型 DC-DC 开关变换器的符号分析	117
4.4 本章小结	125
第五章 PWM 型 DC-DC 开关变换器的符号仿真	126

5.1 概述	126
5.2 MATLAB 语言简介	126
5.3 MATLAB 语言的安装	126
5.4 MATLAB 语言的基本命令	127
5.5 PWM 型 DC-DC 开关变换器数值仿真的 MATLAB 实现	128
5.6 PWM 型 DC-DC 开关变换器符号分析的程序实现	135
5.7 实例仿真分析	139
5.8 本章小结	152
参考文献	153

第一章 PC* 机仿真基础

1.1 概 述

1.1.1 电能变换的概念

电能以其特有的许多优点获得大众的欢迎，因此形成交流电和直流电等品种的广泛应用。但是，电的品种、电压等级或电流大小不一定与用电器具和装置的要求相符，在许多情况下，需要一种装置进行变换。能完成电能形态转换的装置称整流器或变换器 (converter 或 inverter)。设计一个整流器或变换器是电气工程中的系统设计问题，它与许多领域的知识有关，例如，电路、模拟与数字电子技术、半导体变流技术、电力电子技术、电机调速、自动控制理论、开关电源和数学模型等。目前，随着 PC 机性能的提高，使用 PC 机仿真方法帮助掌握这些领域的基本知识并解决设计问题是通行的方法。本书力图通过整流、变换器设计介绍仿真方法。

变换器主要类别相互关系可用图 1-1-1 表示。计有整流器、逆变器、直接 AC-AC 变频器、间接 AC-AC 变频器、DC-DC 变换器 (开关电源) 和离线式 DC-DC 开关变换器等。它们相互关系用交流电 1, 2 和直流电 1, 2 间连线表示。

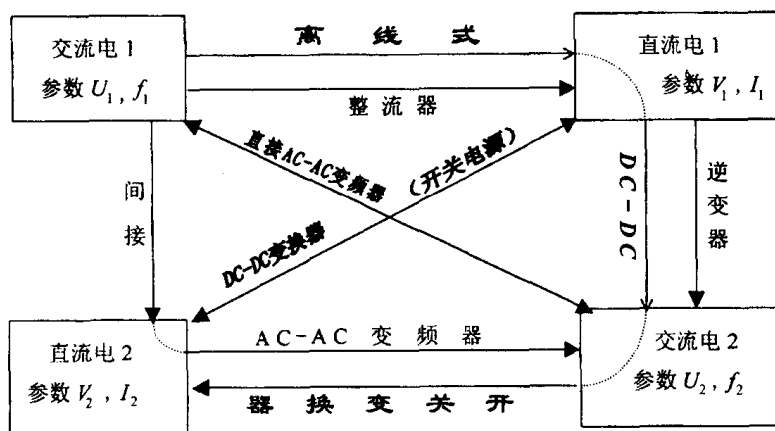


图 1-1-1 电能变换和相互关系示意图

随着科技的发展，整流、变换器在不断发展。每经一段时间，就会发生新老替换。后来者总是以效率高、体积小、重量轻、寿命长、维修容易等优势取代前者。近年来，电气工作者充分利用新的半导体材料、大规模集成电路等新的元器件，利用控制理论和计算机辅助设计等现代化设计手段，使整流、变换器得到极大发展。例如，在直流电压变换时，经历了线性串联调节器后，多数改用 DC-DC 开关式变换技术 (称开关电源)。在电力电子技术中，此是较受重视的技术，因为在交流变换时，有些要经直流环节 (如

* PC 是 personal computer 的缩写，意指微型计算机。

间接 AC-AC 变频器),有些不经直流环节(如直接 AC-AC 变频器),不管哪一种都可利用开关式变换技术中对开关的控制技术。

1.1.2 仿真是设计电气工程电路和系统的有效手段

电气工程电路及其组成的系统主要功能是能源变换、传递过程的控制。要变换的是电力形态,控制方法靠电子线路。电力与电子结合形成了电力电子学科。它是一个较为年轻的学科,也是多学科的边缘学科。电力本质是能源,有相当惯性,控制它的是电子线路,有相当快速性,两者构成系统,尤其形成闭环系统时,用自动控制术语来说属病态系统,意即有不易解决的稳定性方面的问题。这样的系统品质在 80 年代中、后期有飞速的提高。究其原因借助于 CAD(计算机辅助设计)技术。

例如现在的开关式变换器已日益成熟,设计和研制一个新的更好的变换器有一定的难度,重要原因是为求得快响应输出特性,在开关动作时,开关电流、电压的上升率大,引起应力大;体积减小、散热条件变差,变换器内部工作环境趋向恶劣;集成度高、元件密集、电磁的耦联易成干扰,可靠性受到更大挑战;开关频繁切断、接通,在一定条件下会产生谐波;谐波产生的电磁波会污染用电环境。同时,新型变换器一般线路比以前复杂,使用元器件类型、数量增多,元器件参数容差、批容差、组合容差等影响可靠性。如果都采用高质量、高精度的元件,成本提高、市场竞争力下降,更何况电路参数合理性才是根本问题。面对这些复杂问题,按传统方法来设计一个完善的电气系统往往很难达到。

上述这个问题,在使用计算机来进行辅助设计,选择合适电路设计软件时会得到一定的解决。前些时候的软件多解决线性电路、连续工作的稳态电路。这里介绍的软件及方法,既可解决线性电路,也适合非线性电路;既可解决模拟电路,也适合数字电路;既可解决连续状态工作问题,也适合不连续状态工作的问题;既可解决连续稳定工作电路,也适合开关调节的启动工作电路。总之,电气工程电路均可仿真。仿真时,要读取电路中任何一点电流、任何两点间的电压都很容易。还可以进行频率响应、频谱分析、温度分析、参数变化分析、蒙特卡罗分析、最坏情况分析、噪声分析等等。可以说,后面几种分析在面包板实验中是无法模拟进行的。加之,本方法在 PC 机上运行,所以有使用方便、简单的优点。

1.1.3 仿真的目的与优点

根据初拟的或实际电路建立模型,利用计算机对模型进行分析、研究以达到开发或改进真实的实用电路的目的,这个过程称为计算机仿真。近年来,使用计算机画电路原理图,由计算机中的原理图编辑器自动将原理图转化为程序单,即电路网单文件,并标上节点号,进行下续的设计也称为仿真。本书介绍的是后面一种。它有如下一些好处:

(1) 取代人工解析分析,减轻设计劳动强度和重复性劳动。

(2) 提高分析速度、分析精度和分析广度。比真实电路实验可扩大研究范围,测得更多数据。可测一些实验中无法直接测量的数据,如元器件中的数值和波形,研究系统性能受其变化的影响。

(3) 设计任务确定后立即做仿真,进行充分可行性论证后再订购贵重、特殊元件,

既节省资金又缩短开发过程,提高产品的质量.用PC机仿真系统代替实验可大大减少元器件损坏引起的损失.更重要的是某些无法进行实地实验、艰苦和危险场合(如太空),只有通过仿真,才能进行全面的考察,故障的模拟,实际存在的非线性因素允许到什么程度等.

(4) 减小初投资.一套仿真设备就是规模很大的实验室,可以做许多电路与系统产品的研究.本书介绍的软件和方法通用性强,不但可做模拟电路,而且可研究数字电路以及常用的模拟-数字混合电路的仿真.准备工作就是画线路图,或编写不太复杂的程序.这些工作常常比实验室的方案比较、购置元件、线路安装、调试测量、更换坏元件要容易得多.在产品系列化、产品转型、换代时无论在省时、省钱方面均能体现优越性.

根据1998年11月由IEEE北京分部邀请的国际著名日本专家原田耕介(Koosuke Harada)教授来华讲演时介绍,电力电子学科近年发展形成了能源电子学科.所谓能源电子学科,除电力电子学科内容外,还应考虑材料、环境、可靠性、管理等方面的问题,才能解决好能源转换问题.由此可见,如此复杂的系统工程,只有充分利用计算机,处理综合信息才能迅速得到成效.仿真的必要性、有效性可见一斑.但目前所谓能源电子学科的许多制约条件尚未建模.

仿真的不足之处在于使用此法之后尚需做真实电路实验.

1.2 电路仿真分析(建模)常用软件

自60年代计算机应用以来,对分析以模拟状态工作的电路和系统不断提出多种仿真分析方法,但对分析以开关状态工作的电路与系统,一直到70年代才有仿真软件出现.对开关工作的电路与系统的仿真方法,在《开关电源的原理与设计》一书中把它分成状态变量法、节点分析法、改进的节点分析法和状态空间平均法等.书中对Spice2及离散法仿真有详细介绍,并有应用实例.

一般认为,应用普遍并曾对开关工作电路与系统仿真产生影响的软件有如下几种:

CANCER:美国加州大学伯克利分校(University of California, Berkeley)创建的原始电路模拟程序,以它为蓝本发展为Spice(simulation program with integrated circuit emphasis),后来,基于改进节点分析法形成Spice2,获得极大成功,广为使用.

ECAP(electronic circuit analysis program):分析电子线路的程序,在前期发挥作用.

SCAP(switching converter analysis program):美国加州理工学院研制开发,以状态空间平均法为基础的方法,其已获得广泛应用.

还有以节点分析法为基础的EMTP(电力系统瞬态分析工具),ATP(功率变换器和电气传动仿真工具),PECAN(电力电子闭环系统分析工具)等软件也在一定范围内使用.

当前为电源界实际应用的软件还有:

ICAP(interactive circuit analysis program)是Spice发展形成的一种电路分析程序,有IGBT, MOSFET, UC1637, IR2110众多类型元件,在Windows下运行,可以用电

路或图形方式输入,自动转成仿真所需信息,进行仿真.可以用于变压器、整流器、触发器、控制器、静止变换器、电网供电、保护装置等系统分析.

SIMNON, MATIAB 是命令驱动的交互式程序,可以对微分方程、结构图模拟以及数字系统进行仿真分析.这时,电力电子器件一般按理想开关进行系统仿真.

最后还应指出;由 Interactive Image Technologies Ltd. 开发的 Electronics Workbench (电子工作室) 软件也是学习电力电子知识时较受欢迎的软件.因为它提供了模拟和数字电子电路的虚拟实验环境,有和真实实验时一致的可视化界面,含有许多电子元器件模型,也允许自行扩充器件库,甚至输出量与流行的 PCB 设计软件(如 Protel ORCAD 等)连起来,可以布线制版.因此,这种软件在高等学校实验教学中应用较普遍.

1.3 从编程输入到交互绘图输入

考察一个软件好坏的标准是很复杂的,但都离不开使用方便、快捷和仿真精度高等基本要素,围绕这要求还会不断改进.就以 Spice2 而言,从 Spice2 发展而来的同类软件计有:

Pspice(Microsim), Hspice(Meta-Software), IS-Spice(Intusoft), IG-Spice(A.B. Associates), I-Spice(Ncss timesharing)等,最受欢迎的是 Pspice.主要原因是 Pspice(还有 ICAP)充分利用了计算机图形处理技术,可以在计算机显示设备上做到输入、输出图形化.进行电路输入时,可以很直观地在显示器上形成方便使用的几个区.这几个区是:绘图区(点线组成)、元件选择区(用文字、图形或符号显示)、信息显示区(告知使用者是否有错,下一步该做什么)、控制区(使用者输入命令和参数).

无疑,交互绘图法比编程法大进一步,比人机对话电路描述法也好用许多.所谓人机对话,用户可按计算机显示器上提示的信息逐步将电路输入到计算机.这种方法,可以做到使用者提目的、要求,计算机会自动逐步提出问题,使用者作答或进行选择.常见的是一种分级菜单式的人机对话.菜单分一级、二级、三级……逐步细化.但是,过去交互绘图输入,对计算机硬件要求较高,如要有交互式图形显示设备或光笔等.本书介绍的 Pspice 则无需增添上述硬件设备,因为 Pspice 的软件已完成了电路图自动转变成程序工作.另外, Pspice 在算法的可靠性和收敛性、模拟功能提高、参数库和宏模型库的扩充上都有显著的特点,因此应用较广.

1.4 从 Pspice 到 Design Center 所加的新软件

1984 年 Microsim 公司以用 FORTRAN 语言写的 Spice2G.6 为基础,改用 C 语言写成 Pspice 并再改成能在 IBM-PC (包括兼容机)上应用的软件.由于 Pspice 有价格低廉的学生版,所以在学生中普及很快.由学生又很快普及到社会各界,从而应用更趋社会化.当其引起普遍注意后,在 1992 年由美国 Microsim 公司加上了使用方便的 Schematic Entry 软件,能完成用电路图输入的功能,成为一套电路分析的软件,并正式更名为“Design Center”,成为仿真“设计站”.

Design Center 在画完电路图后, 呼叫 Pspice 程序即能进行仿真. 整个工作在 Windows 下进行. 这样避免了传统的用文字来描述电路以及用键盘输入的麻烦. 到现在为止可以见到 Design Center 5.3 版本了.

Design Center 主要有 Schematics 软件, 该部分相当于一个软体“石包板”, 它主要由 Pspice 和 Probe 两部分构成. 前者是主要的部分, 所有画的电路经由它转化成网单文件, 编好序号, 翻译成可计算的程式, 并计算后输出. 后者(Probe)相当软体“示波器”, 可观察输出, 可得到输出统计资料.

Design Center 除了 Schematics Entry 软件外还有 Stimulus 软件. 它是一个相当于信号发生器的软件, 可以产生多种模拟的或数字的信号, 甚至一般信号发生器不能产生的波形. 另外还有 Parts 软件, 供使用者自行建立未提供元件的模拟参数. 最后还有 Filter Designer 软件. 输入滤波器的目标参数即可自动给出电路及元件参数, 供快速设计滤波器应用. 必要时也可以整合印制电路板制作的软件, 在此不作深入的介绍.

1.5 Design Center 的安装

1.5.1 Design Center 的硬件要求

Design Center 在 IBM-PC 上运行, 主要硬件是: ①主机 486/586; ②>4MB 的动态 RAM; ③200M 以上(学生版与专业版有些不同)的硬盘; ④RS232 串行口(供专业版连接保护装置); ⑤1.2MB 软盘驱动器; ⑥VGA 或 EGA 彩显; ⑦MS-DOS 3.0 以上; ⑧ Windows 3.0 以上; ⑨鼠标.

1.5.2 安装步骤

Pspice 7.1 版本是在 Windows 95 环境下运行的, 其安装方法如下:

首先将含有 Pspice 7.1 软件的光盘放入光驱动器, 然后开机进入 Windows 95→点选我的电脑→点选 [D:] 光驱动器→出现光盘目录→点选 Pspice 7.1→出现文件目录→点选 Instut95→点选 Setup32→出现对话框, 指示典型安装、选择安装和最小安装三种安装方式, 一般可选择典型安装(Typical)→Next→此时机器开始安装, 约几分钟后, 出现 Microsim Eval 7.1 画面, 再点选 Next, 出现 Finish 字样, 用鼠标点一下 Finish, 出现 Pspice 的在线说明书. 至此, 全部安装过程结束.

1.6 Design Center 环境的介绍

因为 Design Center 是在视窗 Windows 环境下工作的套装软件, 有关视窗环境基本操作方法与 Windows 相同. 在此要求读者对 Windows 有一定了解, 如不了解可参考其他有关文献.

Schematics 是 Design Center 软件的核心部分, 包括电路图编辑和元件符号编辑两个视窗.

1.6.1 电路图编辑视窗

在电路图编辑视窗中自上而下主要有如下各栏：

(1) 标题栏. 此栏有下列信息：

① “*” 表示此图修改后未存档；

② “P. 〈#〉” 表示当前显出的电路图为第〈#〉页数；

③ “Part:〈name〉” 表示最近呼叫过的元件名称；

④ “(stale)” 表示此图之前的图已做过仿真并在仿真后修改为现图，如不出现 stale，则表示此图未做过仿真；

⑤ “(current)” 表示当前仿真所得是由所见的电路而来，如不出现 current，则表示此图未做过仿真；

⑥ “(simulation error)” 表示所见的电路图在仿真中中断或出错。

(2) 功能栏

此为标题栏下的一栏，列出各项功能，如 Edit (编辑)、Draw (画图)、Analysis (分析) 等，当用鼠标点选后，呼叫执行。

其中 Help = F₁，表示一旦需要，点选 Help = F₁ (或直接按 F₁ 键) 可进行在线查询，可对任何执行功能进行了解。

(3) 状态栏

显示在画面倒数第二行，此栏有下列信息：

① 游标〈Cursor〉，所在位置的 X 和 Y 坐标值；

② 指令执行后提示〈错误〉信息。

1.6.2 元件符号编辑视窗

在元件符号编辑视窗中最上一行的标题栏有如下信息：

① 目前所编辑元件的符号名称及包含此元件的符号元件库；

② 符号元件库所在的子目录路径；

③ 元件符号的属性。

了解上述一般规则之后，可以试着呼叫出 Schematics, Pspice 和 Probe 三视窗。

1.7 电力电子仿真实理论的发展概况

1.7.1 仿真实理论研究是电力电子发展的关键

仿真研究是从建电路方程和解方程起步的。模拟量连续工作的电路仿真较为容易；开关断续工作的电路是非线性电路，仿真较为困难。就目前发展来看，既有模拟量连续工作，又有开关断续工作的电力电子仿真最为困难。目前电力电子仿真实理论研究落后于实践，仿真研究成了电力电子领域的关键问题。

一些电力电子学专家的研究主要放在 DC-DC (直流-直流) 开关变换器的拓扑、控制、系统建模、稳态分析和瞬态分析上。这些都是电路分析设计的主要问题。

不管采用什么形式的输入方法, 如何建立电路的方程(即仿真模型)和如何求解电路方程是要解决的主要问题. 相对而言, 前者尤为重要. 因为所谓解方程, 主要是采用某种数值计算方法(如牛顿-拉夫逊方法). 数值计算方法已有现成的好几种, 根据情况选择就是了.

1.7.2 DC-DC 变换器仿真分析(建模)方法概述

闭环工作的 DC-DC 变换器, 属于时变非线性周期工作的系统, 对此, 如用经典分析方法(如拉氏变换和奈魁斯特等)很难进行研究.

随着开关变换器和计算机辅助设计技术的发展, 仿真分析(建模)方法也得到迅速发展. 常使用的有分析建模法, 该法用解析表达式作为模型, 以对特性进行定性、定量仿真分析. 这种方法, 就 PWM 型变换器而言有连续平均法、离散平均法和两者结合起来的方法; 就谐振型 DC-DC 变换器而言有二端口等效电路法、状态平面法、交流等效电路法等. 其中 PWM 型变换器离散平均法是把在一个周期中特定时刻的变量值作为求解值, 例如建立时刻 $(n+D)T_s$, 或时刻 nT_s (n 为周期序号, D 为占空比, T_s 为周期)的描述这个变量与各作用量之关系的差分方程或 Z 变换函数关系, 求解此差分方程或通过 Z 变换得到变量解析式.

这个方法优点是准确度高, 缺点是求解程序复杂, 所得结果物理概念不明确, 难指导设计. 连续平均法是把一个周期内有两个或三个不同电路拓扑的电路, 在某种意义上进行平均, 从而变成一个电路拓扑连续工作的电路, 对此电路用一连续的微分方程组描述之, 然后用解微分方程式(或 s 域分析)得到稳态和动态小信号特性的解析解. 这种方法能用人们熟知的经典的线性电路理论和控制理论来解决非线性电路的工作, 物理概念清楚, 方法上也易于掌握, 因此受到普遍欢迎. 缺点是此法只能用在扰动频率比开关频率低很多的情况, 如果扰动频率较高(例如达到开关频率一半时), 误差很大.

根据上面的连续平均法概念产生过许多各自不同的平均方法. 最早(1973 年)对 PWM 型 DC-DC 变换器建模分析的是 Wester 的电路平均法. 它从变换器电路出发, 对电路中的非线性开关元件进行平均和线性化处理, 得到 Buck, Boost, Buck-Boost 变换器连续工作模式的线性等效电路. 该方法的特点是等效电路与原电路拓扑一致. 1976 年 R.D.Middlebrook 等人提出状态空间平均法, 该方法的步骤如下:

(1) 画出变换器每一种状态的线性等效电路. 在连续状态下, 对应于开关在不同的位置有两个等效电路; 在不连续状态下, 则有三个等效电路.

(2) 写出每一状态等效电路的电路方程.

(3) 对所列电路方程按开关占空比 D (导通时间 t_{on} 与周期 T_s 之比), D' (关断时间 t_{off} 与周期 T_s 之比)作为加权时间进行平均处理, 将两个或三个方程组合并为一组平均状态方程组.

(4) 扰动上面所得的平均状态方程组, 以产生直流分量和交流分量, 交流分量即小信号分量. 运算中忽略所有非线性高阶项.

(5) 把小信号分量方程从时域转换到复数频率域(即所谓 s 域).

(6) 相应于数字模型画出等效电路模型.

这种方法得到了四种基本电路(指 Buck, Boost, Buck-Boost 和 Cuk)在连续或不连续

状态的模型系数及电路。

此方法影响深远，至今仍受欢迎。在此基础上发展了各种各样的等效平均法。1987年美国弗吉尼亚功率电子中心（简称 VPEC，下同）的 V. Vorperian 提出了三端开关器件模型法，把变换器的开关晶体管和二极管作为整体看成一个三端开关器件，用其端口的平均电压、电流的关系来表征，然后把它们适当地嵌入到要讨论的变换器中，变成平均值等效电路。此法建立了统一的开关模型，建模方法灵活简单，但建模时需预知变换器的直流稳态特性。张兴柱、许建平先生提出等效受控源法，把开关晶体管经过平均处理后用受控电流源代替，二极管用受控电压源代替，电路的其他部分保持不变。用此模型分析的结果与状态空间平均法相同，这种方法优点是等效电路与原电路结构相同，保留信息最多、处理简单、概念清楚。蔡宣三先生等推导出的 PWM 型 DC-DC 开关变换器统一的大信号等效电路，分析了变换器工作特点，并进行数值仿真计算。仿真精度较高。

电路平均法强调的是对开关元件的处理，而高潮先生提出的脉冲波形积分法强调对电路中各支路电压和电流的处理。它用脉冲函数将变换器的各个子拓扑统一表示在一个等效电路中，但只讨论了电路的连续工作模式。因其忽略了电路变量纹波的影响，此法的实质是平均法。

不论是对全电路进行时间平均的状态空间平均法还是对开关元件进行时间平均处理，都能简单、有效地对 PWM 型 DC-DC 开关变换器进行直流稳态分析和动态小信号分析，但不能进行纹波分析。这是因为这些方法在建模过程中进行了平均处理，有关纹波的信息被平均掉了；同时，由于假设小信号远小于直流稳态值，故也不能进行大信号分析。

80 年代初期，开关变换器开关频率可达几十千赫，可以以各个开关工作周期为单位，对系统进行离散化，建立系统的差分方程，或采用 Z 变换技术。由于离散法在 DC-DC 变换器建模分析过程中未作任何近似假设，故这种方法可以分析任何一种 DC-DC 变换器。Projoux 提出了一种精确描述多种拓扑非线性系统的线性化离散模型，并应用在对连续工作的 Boost 变换器为例的分析中。VPEC 的 F.C. Lee 等人则将 Projoux 的线性化离散模型推广到断续工作的模型，并分析了 Buck，Boost，Buck-Boost 三种电路的工作。

随着开关变换器技术的发展以及 VMOSFET 管的应用，开关工作频率极大地提高。VPEC 在 80 年代中期以来，提出准谐振(QRC)电路，零电流、零电压多谐振(MRC)电路和周期准谐振(CQRC)电路，由此派生出许多新型变换器。变换器的谐振工作，巧妙利用了开关器件的极间寄生电容参量，把工作频率提高到兆赫数量级。

VPEC 的 Vorperian 等人利用三端开关理论对串联谐振变换器进行模型分析，得出电路的电压转换比 M 与开关频率 f_s 和自然谐振频率 f_N 的关系 ($f_N = L_r/C_r$ ，式中 L_r ， C_r 是滤波输出回路有关参数)，以及 M ， f_s/f_N 和负载电阻 R 的关系。分析表明，串联谐振变换器参数 f_s/f_N 的重要性与 PWM 型 DC-DC 开关变换器中的占空比 D 是相当的。 f_s/f_N 和 D 都是在 0 至 1 之间变化。这样，状态空间平均法赖以使用的前提，即要求输出滤波器的特征频率 f_f 远低于开关频率 f_s 就不成立了。状态空间平均法不能适用于谐振变换器。虽然，曾用降阶方法处理，但是，当要把高阶方程降至较低时，显得很

繁琐。尤其串联谐振变换器发展起来的 QRC, MRC, CQRC 等是高阶谐振系统, 它由 LLC 电路、LCC 电路和 LLCC 电路组成。由于系统状态变量增加, 把系统降阶处理很复杂, 状态空间法趋于不能使用。

人们从时域分析和状态平面法转而改用频域分析法。频域分析法是利用傅里叶级数和双口网络理论来分析串联谐振变换器电路, 并可推广到其他谐振拓扑中去。在一定程度上其等效模型比较简单, 但仍是无法得到输出电压的纹波大小。

1.7.3 符号分析法及本书对该法的介绍

80 年代末, 我国学者丘水生先生在访问加拿大期间与 I.M.Filanovskg 一起研究非线性电路的稳态振荡计算时提出了一种新方法。90 年代初开始用此法研究 PWM 四种基本电路拓扑、E 类放大器工作等。1996 年在《电子学报》介绍此法时, 称之为“符号分析法”。经使用说明, 此法是求解强非线性高阶系统的一种精度高, 且分析过程简单的方法。它能够求得变换器稳态的符号周期解表达式。在该表达式中, 包含变换器状态解的 1—3 次纹波的近似解析解。仿真结果说明, 可以求解强、弱非线性高阶系统, 所得仿真精度较高, 使用也简单、方便。

在本书的第四章对符号分析法进行了推证, 第五章结合 PWM 的四种基本形态电路拓扑介绍其使用方法, 在仿真分析时借助了 Matlab 软件解矩阵。为了使使用者能实际应用符号分析法, 给出了软件包。这样, 即使在不了解符号分析法的情况下, 照样能解强非线性电路的稳态、暂态问题, 尤其能求得稳态下的纹波值。为设计要求预知纹波值的情况提供了解决办法。目前此法正应用在对谐振变换器的研究。

Matlab 软件被公认为是解决电路仿真较好的工具, 已有专门书籍介绍。为了方便, 本书在使用前, 在第五章进行了简单的介绍。

1.8 PSPICE 的基本功能

使用 PSPICE 来模拟电路时, 首先要在屏幕上画出要分析的电路。画电路时首先要从元件库找到所需元件如电阻、电容、电感、晶体管、场效应管、集成电路等。PSPICE 有一个庞大的元件库, 其中几乎包括了目前世界上已经生产的所有型号的半导体器件的模型。取出过程称为调出, 调出元件后, 再用“画笔”画上连接导线, 组成完整的电路。有些元件如电阻、电感、电容等, 软件中已有一个预设值, 如不符合使用者的要求时可以重新设定。

画好电路后即可对电路进行各种分析, 最基本的分析包括直流分析、交流小信号分析、瞬态分析和上面三种分析一起使用的分析。下面分别对前三种分析加以说明, 其他如温度分析、最坏情况分析、调变参数分析等将在后面分析电路实例时予以说明。

1.8.1 直流分析

直流分析包括直流工作点分析、直流扫描分析、计算直流小信号传输函数和直流小信号灵敏度分析, 以下进行详细说明。

1. 计算直流工作点

在电路分析中, 确定直流工作点是十分重要的. 实际上, PSPICE 在作其他任何类型的电路分析之前, 都必须先计算电路的直流工作点 (也就是计算电路中各节点电压和各元件上的直流电流). 直流工作点实际是一个电路的具体状态. 因为一旦给电路加电, 电路马上建立直流工作点. 对大部分电路来说, 直流工作点是稳定、无振荡的. 因而, PSPICE 可以求得直流组的解. 计算直流工作点对于确定电路中半导体元件的参数和模型也是必需的. PSPICE 在作直流分析时把电路中的电感视为短路, 电容视为开路, PSPICE 在完成直流工作点的计算后, 可按要求输出电路所有节点的电压, 所有独立电源的电流和功率消耗, 非线性受控源的小信号参数和全部半导体元件的直流工作点参数和有关模型参数等.

2. 直流扫描分析

直流扫描分析的意义是计算当电路中某一个(或两个)直流电源电压(或电流)变化或其他电路元器件数值变化时电路中直流工作参数的变化情况. 直流扫描分析实际上相当于使电源或元件参数在某一范围内波动, 然后再对电路求一系列的直流工作点. 因此这一过程要多次重复.

PSPICE 作直流扫描分析的过程是这样的: 电源起始于设置的初始值, 对电路求静态工作点. 然后, 电源的参数值按照指令中规定的步长增值后再进行求工作点的计算. 重复这一过程直至电源参数到达指令中规定的终止值并作完最后一次求工作点的运算为止. 直流扫描分析的过程虽然在功能上等同于电源变化情况下的多次求静态工作点运算, 但其运算速度比想像中的速度要快得多. 这不仅仅是因为每次分析都省略了输入电路和输出结果这一费时的步骤, 而且由于直流扫描分析时前一步的分析结果可以用于估计后一步电路直流方程组的解, 因此可以缩短求解直流方程组的时间.

分析时, 直流扫描类型有四种: ①线性扫描, 扫描变量按线性变化. ②数量级扫描, 扫描变量按数量级变化. ③倍频程扫描, 扫描变量按信频频程规律. ④列表扫描, 按自行列出的任意的起始和终止值变化.

除了上面提到的电压、电流(独立源)、元器件数值可作为扫描变量之外, 温度和模型参数也可以作为扫描变量.

3. 计算直流小信号传输函数

直流小信号传输函数的计算是另一种直流分析, 它侧重于计算电路的直流外部特性. 分析结果包括:

- (1) 小信号直流增益;
- (2) 直流输入阻抗;
- (3) 直流输出阻抗.

所谓小信号是指电路中信号的幅度非常小(近于零), 此时, 可认为电路处于线性工作状态, 要知道尽管信号幅度接近于零, 但这并不意味着电路处于“关闭”或“不变”状态, 各节点电压更不是全为零. 此时的电路一直处于正常的直流工作状态, 只是作用

于电路的激励非常小, 各处的输出的增量也不会大。直流小信号分析即是计算这种电路在小信号作用下传输函数值, 即输出与输入之比(增益), 也可计算输入阻抗和输出阻抗。

增益定义为输出量变化相对于输入量(信号)变化的比值。根据输入输出参量的不同, 小信号增益共有四种并分别定义如下(见图 1-8-1, 图中下标 o 表示输出, 下标 i 表示输入.):

- (1) 小信号电压增益: $\Delta V_o / \Delta V_i$;
- (2) 小信号电流增益: $\Delta I_o / \Delta I_i$;
- (3) 小信号跨导增益: $\Delta I_o / \Delta V_i$;
- (4) 小信号互阻增益: $\Delta V_o / \Delta I_i$ 。

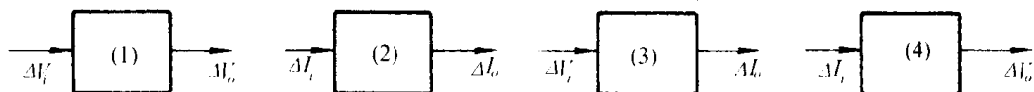


图 1-8-1 小信号增益

PSPICE 在计算直流传输函数的同时, 自动计算出电路的输入阻抗和输出阻抗, 这对考虑电路的匹配问题十分有用。输入、输出阻抗的定义如下:

输入阻抗: $\Delta V_i / \Delta I_i$

输出阻抗: $\Delta V_o / \Delta I_o$

4. 灵敏度分析

PSPICE 可以用来验证设计和改进设计。对验证设计来说, 用户需要测量系统或电路的各项电性能是否能够满足要求。对改进设计来说, 用户要使系统或电路更稳定、更可靠地工作, 并且要尽可能地降低成本。直流小信号灵敏度分析可以帮助设计者找到对电路直流工作时影响最大的元件(即对电路的直流特性影响最敏感的元件)。进而, 我们可以设法减小这些元件变化对电路的影响程度。PSPICE 在计算完直流偏置点之后随即进行直流灵敏度分析, 它将改变每一个偏置元件的值并记录它们的变化对直流工作点的影响, 然后按需要自动输出计算结果。

灵敏度分绝对灵敏度和相对灵敏度。前者指元器件参数变化单位值时, 考察的输出变量的相应变化量; 后者指元器件参数变化 1% 时, 输出变量的相应变化量。

目前只能分析直流参数的灵敏度。

1.8.2 交流小信号分析

PSPICE 对电路的交流小信号分析是一种线性频域分析。它主要包括频率响应分析、计算交流输入输出阻抗、群时延特性分析和噪声分析。

1. 频率响应分析

PSPICE 最常用的功能之一就是分析电路的频率响应。频率响应分析是在整个规定的扫描频率内计算电路中所有节点电压和支路电流的交流响应。频率响应分析的输出包