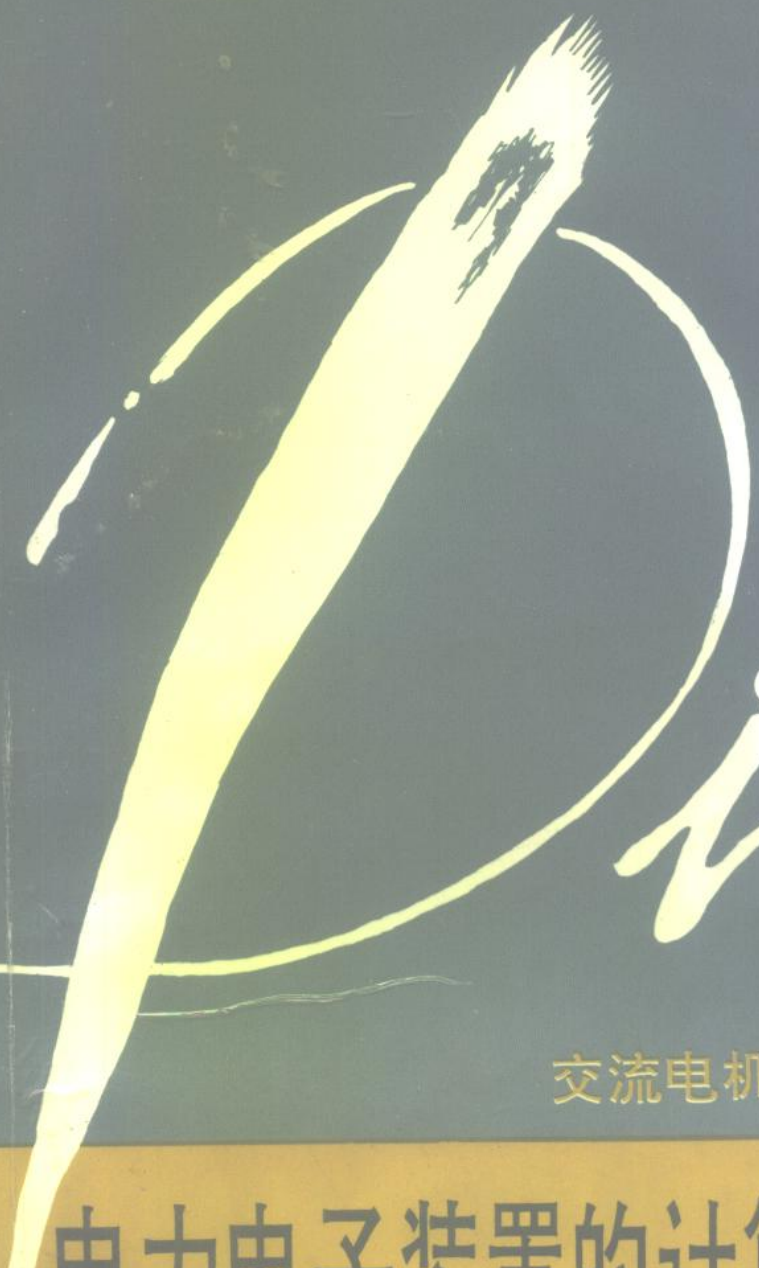


浙江大學出版社
黃進 編著



DiCunji

交流电机调速系列教材之三

电力电子装置的计算机辅助分析

交流电机调速系列教材之三

电力电子装置的 计算机辅助分析

黄 进 编著

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

内 容 简 介

本书是校际联合编写的交流电机调速系列教材之三。

计算机辅助分析技术作为工程设计和产品研究开发的一种现代化手段正得到越来越广泛的应用。为帮助有关专业的工程技术人员和高等院校有关专业的学生学习和掌握如何在电力电子装置的研究、设计和分析中应用计算机辅助分析技术,我们编著了这本书。

全书由八章构成,系统地论述了电力电子装置计算机辅助分析技术的理论方法和软件实现。遵循从一般到特殊的原则,本书介绍了几种相辅相成的通用分析方法和相应的高效软件实现技术,各具体的电力电子装置的分析则作为特例予以介绍。所介绍的方法不仅可以用于分析电力电子装置的静态和动态特性,而且可用于电力电子装置的故障分析。

本书可作为电机及其控制、自动控制与电力拖动、电力电子技术等专业的研究生和高年级本科生的教材或教学参考书。对从事电力电子装置、机电控制系统与机电一体化产品研究、开发、设计与运行的工程技术人员也具有较高的参考价值。

* * *

787×1092 16 开 13.25 印张 365 千字

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月第 1 次印刷

印数: 0001—1500

ISBN 7-308-01335-9/TP·103 定价: 6.45 元

前 言

随着电力电子技术和微电子技术的发展,各类电力电子装置的功能越来越完善,在各类机电控制系统中得到越来越广泛的应用;随之而来的是这类装置的结构越来越复杂,给这类装置的研究、设计和分析增加了难度,传统的理论分析方法不再能够完全适应。而计算机技术和数字分析技术的发展则为电力电子装置的设计、分析和调试提供了现代化的高效手段。为帮助有关专业的工程技术人员和高等院校有关专业的学生学习和掌握如何在电力电子装置的研究、设计和分析中应用计算机辅助分析技术,我们编著了这本书。

本书系统地论述了电力电子装置计算机辅助分析技术的理论方法和软件实现。遵循从一般到特殊的原则,本书介绍了几种相辅相成的通用分析方法和相应的高效软件实现技术,各具体的电力电子装置的分析则作为特例予以介绍。所介绍的方法不仅可以用于分析电力电子装置的静态和动态特性,而且可用于电力电子装置的故障分析。全书由八章构成,前两章是基础,介绍了计算机辅助分析的基本概念和半导体开关元件的电路模型和逻辑模型;第三章介绍了基于电路网络拓扑分析的电力电子电路网络分析法;第四章介绍数值积分方法,它不是对数值分析技术的简单重述,而是针对电力电子装置计算机辅助分析技术的特点,介绍了数值积分方法的稳定性、刚性状态方程的数值积分以及积分步长的自动控制,同时介绍了以后几章中用到的一些基本概念;第五章介绍了电力电子装置的综合和一些实用的解析分析法,这些分析法是用以后各章介绍的方法对电力电子装置进行分析的基础;第六章介绍了电力电子装置阶段分析法的基本思想和程序结构,最后以无换向器电机的仿真为例对本章的内容做了总结;第七章介绍了大型机电控制系统的模块分析法,在介绍了强耦合与弱耦合的概念后,介绍了如何将一个大系统分解为一些较小的系统来分析。PWM 逆变器供电的异步电机调速系统和交—交变频器供电的异步电机调速系统的分析将作为本章的实例;最后一章介绍了电力电子装置的稳态分析法,并简要介绍了线性增量分析法。

本书是《交流电机调速系列教材》的第三本。它以编著者多年的研究成果和教学实践为基础,结合国内外同行的研究成果编写而成的。本书的初稿完成于1988年,同年夏天在浙江大学电机系为研究生开设了这门课程。此后至今的五年内,根据研究工作和教学实践的最新成果,对本书的内容和章节安排做了多次重大修改。本书注重循序渐进,由浅入深,即有理论分析,又有实践应用。可作为电机

及其控制、自动控制与电力拖动、电力电子技术等专业的研究生和高年级本科生的教材或教学参考书。对从事电力电子装置、机电控制系统与机电一体化产品研究、开发、设计与运行的工程技术人员也具有较高的参考价值。

本书是在本系列教材主编、浙江大学许大中教授的组织下完成的；法国图鲁兹国立综合技术学院的 M. LAJOIE-MAZENC 教授、法国南希电工和电子研究所的 B. DAVAT 教授、瑞士洛桑联邦综合技术学院的 F. BORDRY 教授以及加拿大魁北克大学的 A. KAMAL 博士提供了许多宝贵的资料和有益的讨论与建议；东南大学的赵家璧教授、南京航空大学的刘迪吉教授、华中理工大学的陶醒世教授和福州大学的卓忠疆教授给予了宝贵的鼓励和建议；编著者在此向他们表示诚挚的谢意。本书的出版还得到了国家博士后基金和国家自然科学基金青年基金的资助。

受编著者水平和篇幅的限制，本书一定存在不少错误和疏漏之处，恳切希望读者批评指正。

编 者

1993 年 12 月

目 录

第一章 概述	1
§ 1-1 电力电子装置	1
§ 1-2 电力电子装置的计算机辅助分析	2
§ 1-3 计算机仿真程序的基本结构	4
第二章 半导体开关元件的模型	6
§ 2-1 常用开关元件的特性	6
§ 2-2 开关元件的分类与组合开关元件	13
§ 2-3 电路模型的基础知识	16
§ 2-4 常用半导体元件的电路模型	20
§ 2-5 开关元件的逻辑模型	25
第三章 电力电子电路的网络分析法	34
§ 3-1 电路描述与数据结构	34
§ 3-2 网络的计算机分析	39
§ 3-3 状态方程和输出方程的自动建立	48
§ 3-4 开关元件状态变化的检测	55
§ 3-5 仿真程序的总体结构	60
§ 3-6 电力电子电路—复杂负载的仿真	61
§ 3-7 电力电子电路—控制器的仿真	66
第四章 状态方程的数值积分	67
§ 4-1 数值积分方法及其稳定性	67
§ 4-2 线性刚性状态方程的数值积分	73
§ 4-3 非线性刚性状态方程的数值积分	77
§ 4-4 计算步长的自动控制	80
第五章 电力电子装置的综合与分析	84
§ 5-1 电力电子装置的输入与输出	84
§ 5-2 变电器的基本结构	86
§ 5-3 基本结构中开关元件的选择	90
§ 5-4 仿真程序在结构综合中的应用	94
§ 5-5 换向辅助电路	99
§ 5-6 电力电子装置的相平面分析	100
§ 5-7 电力电子装置的复平面分析	108
§ 5-8 电力电子装置的解析分析	112
第六章 电力电子装置的阶段分析法	119

§ 6-1 阶段分析法的基本思想	119
§ 6-2 阶段分析程序的编写	124
§ 6-3 按简化阶段转换图编程	133
§ 6-4 阶段分析程序的程序结构	136
§ 6-5 无换向器电机的阶段分析	137
第七章 机电控制系统的模块分析法	146
§ 7-1 强耦合系统与弱耦合系统	146
§ 7-2 大系统的分解	150
§ 7-3 模块分析程序的编写	155
§ 7-4 PWM 逆变器供电异步电机调速系统的模块分析	159
§ 7-5 异步电机交—交变频调速系统的仿真	164
第八章 稳态与线性增量分析	176
§ 8-1 稳态运行点的直接寻找	176
§ 8-2 斩波器的线性增量分析	181
附录 I 仿真过程组织通用子程序	185
附录 II 旋转电机的数学模型	190
附录 III 布尔矩阵及其运算	199
附录 IV 矩阵指数函数法解状态方程子程序	200
参考文献	205

第一章 概 述

§ 1-1 电力电子装置

通常人们能够直接获得的电能有两种形式：直流电和交流电。由蓄电池或直流发电机可获得直流电，其电压值常是恒定的；由工业电网可获得交流电，其频率和电压幅值是恒定的。

但许多用电设备或负载要求更加多样化的电能形式，如电压大小可调的直流电或交流电以及频率可调的交流电。

这就需要一种装置，它将通常所能直接获得的电能形式转换成用电设备所要求的电能形式。完成这种电能形式转换的装置称作变电器(Converter)。本书所涉及的变电器是由半导体电力电子开关元件如二极管、三极管、晶闸管等所构成的电力电子电路，故又称为静态变电器(Static Converter)。

图 1-1 表示不同形式电能之间的转换。图中 E_1 和 E_2 表示两个电压值不同的直流电，(V_1, f_1) 和 (V_2, f_2) 表示两个电压幅值与频率各不相同的交流电。由图可见，根据所完成的电能转换功能的不同，可将电力电子电路或变电器分为以下几类：

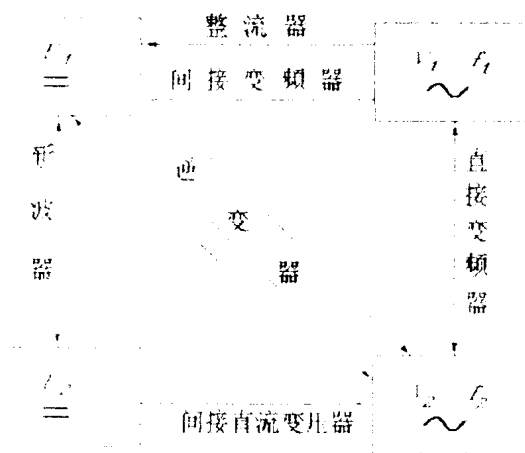


图 1-1 电力电子电路的分类

斩波器：它把一种电压幅值的直流电直接转换成另一种电压幅值的直流电，相当于直流变压器。

直接变频器：它实现两个电压幅值和频率不相同的交流电系统之间的能量传输。尽管称之为变频器，其实它既可变换频率的大小，亦可变换电压的大小。

整流器：它是大家所熟悉的一种变电器，它实现从交流电系统到直流电系统之间的能量

传输。

逆变器:它实现的功能正好与整流器相反,它完成从直流电系统到交流电系统的能量传输。根据逆变器输入端是电流源性质的或是电压源性质的,逆变器又可分为电流型逆变器和电压型逆变器。

以上几种电力电子电路实现从一种电能系统到另一种电能系统的直接变换,故统称为直接变电器。在许多应用场合,需要一种间接的变换过程,如给交流电机供电的逆变器的直流输入电源常是由交流电网经过整流器而得到的。这种由多个直接变电器构成的,中间经由第三种电能形式而将一种电能形式转换成另一种电能形式的电力电子电路称为间接变电器,常用的有以下两种间接变电器:

间接变频器:它实现的电能转换过程与直接变频器相同,但中间经过一直流电系统。

间接直流变压器:它实现的电能转换与斩波器相同,但中间经过一个交流电系统。

近年来,随着微电子技术和电力电子技术的发展,电力电子设备被广泛应用于工业的各个领域以取代陈旧的、低效率的用电设备。直流输电系统、各种电机调速系统和伺服系统、半导体中频电源系统等都是电力电子技术应用的例子。在这些系统中,电力电子电路与电源、负载及控制器构成一个有机的整体,它们之间通过相互作用从而令人满意地完成从电源到负载(或从负载到电源)的能量传输,如图 1-2 所示。我们把由电源、电力电子电路(即变电器)、负载及控制器构成的这样一个系统称作电力电子装置。通常人们感兴趣的不仅是变电器本身的特性,更感兴趣的是电力电子装置作为一个整体的特性以及构成它的各部件之间的相互作用。因此本书不仅将介绍电力电子电路或变电器的计算机辅助分析的方法,也将介绍由电源、变电器、负载及控制器所构成的电力电子装置的计算机辅助分析的方法。

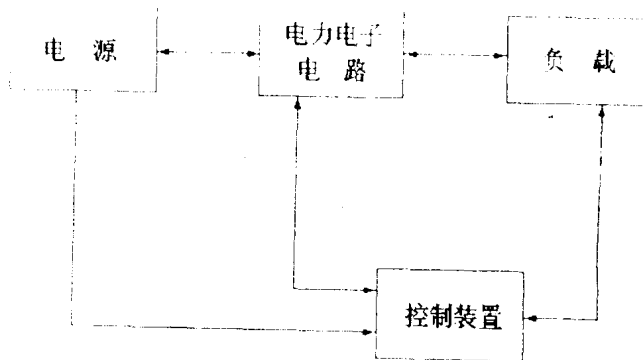


图 1-2 电力电子装置

§ 1-2 电力电子装置的计算机辅助分析

电力电子装置的分析过程与其它系统的分析过程一样,首先必须适当地建立它的数学模型,即列出平衡方程,然后以适当的解析或数值的方法解这个方程。当系统较简单或系统的阶数较低时,通常可以用解析的方法解这个方程,而当系统较复杂或系统的阶数较高时,解析的方法就无能为力了,这时可借助于计算机用数值计算的方法来分析这个系统。

计算机辅助分析又称计算机仿真,不仅可以用来取代人工的解析分析,减轻劳动强度,提

高分析速度和分析精度,而且计算机辅助分析也是试验测试所无法取代的。首先,采用试验测试,系统中有许多量难以甚至无法直接测得,如电机气隙中的磁通就较难通过试验测得,集成电路中某一元件的电流或电压用试验的方法则无法测得,而应用计算机辅助分析的方法,这些量则和其它量一样可以被容易地测得;其次,在系统的设计阶段,实际的系统还不存在,若要验证设计思想的正确性就只有采用计算机辅助分析的方法。最后,试验测试所需的费用一般要比计算机辅助分析高得多,特别是在系统还不成熟时,试验分析常要损坏系统的一些部件,而计算机辅助分析则不存在这个问题。总之,采用计算机辅助分析的方法来进行系统的设计与研究,将会大大降低研究费用,缩短研究周期。尽管如此,由于计算机辅助分析是通过用系统的数学模型来模拟实际的系统,为了建立系统的数学模型,总是要对实际的系统作或多或少的简化,在用计算机通过数值计算的方法解系统数学模型的过程中也难免存在计算误差,此外系统的工作环境千变万化,因此计算机辅助分析是无法完全取代试验分析的。

最早的计算机辅助分析软件,是60年代出现的用于分析电子电路的软件,如大家所熟悉的SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)和ECAP(Electronic Circuit Analysis Program)。很自然地,这些软件也被用于分析电力电子电路。这些软件采用了很精细、很复杂的半导体元件的模型,能够很精确地反映半导体元件的放大特性和开关特性。然而这对于只对电力电子电路的整体特性感兴趣的使用者来说就变成了一个缺点,因为采用这样复杂的模型使得计算时间冗长得无法忍受。

由于缺乏适用于电力电子领域的计算机辅助分析软件,70年代末以来许多电力电子领域的学者投身于这类软件的开发,出现了许多电力电子电路的分析软件。根据其设计思想的不同,这些软件可以分为两大类,分别称之为网络分析软件和阶段分析软件。网络分析软件的设计思想与60年代出现的用于分析电子电路的软件如SPICE基本相同,都是建立在网络拓扑分析的基础上,不同的是所采用的半导体元件的模型,由于电力电子电路中,半导体元件均工作于开关状态,因此可以采用简单得多的半导体元件的模型,从而使得计算机计算时间较SPICE等软件大为缩短。网络分析软件的优点是适用于不同结构的电力电子电路,因此在电力电子电路的设计阶段是很适用的;其缺点是程序结构较复杂,所需的计算机计算时间仍较长,不适合于电力电子装置在不同的控制方式下特性的比较研究和具有复杂负载(如各种电机)的电力电子装置的分析。

电力电子电路中各半导体元件都工作于开关状态,根据电路中各半导体开关元件的导通与关断的不同组合,可以将电路的整个运行过程分解成一系列的阶段,这些阶段按照一定的顺序,周期性地反复出现,构成了变电器的各种运行方式。阶段分析软件就是根据这一特点而编写的。阶段分析软件具有比网络分析软件更好的快速性,而且程序简单,结构性强,易于编写,适合于具有较复杂负载的电力电子装置的分析 and 在不同的控制方式下电力电子装置特性的比较研究。但阶段分析软件只适合于特定的电力电子装置,对于不同结构的电力电子装置必须编写不同的分析程序。

线性电路的计算机辅助分析包括的内容很多,如直流分析、交流分析、暂态分析、灵敏度分析等等,但电力电子电路作为一种非线性电路的计算机辅助分析主要包括暂态分析、稳态分析和非线性畸变分析,而稳态分析和非线性畸变分析均可建立在暂态分析的基础上。因此本书将主要介绍电力电子装置的计算机辅助暂态分析,或称为电力电子装置的仿真。

§ 1-3 计算机仿真程序的基本结构

采用计算机对电力电子装置进行分析的整个过程如图 1-3(a)所示。这个过程的输入为所要分析的电力电子装置,输出为分析结果。整个过程由三个部分构成。第一部分为电力电子装置的仿真作准备工作,它将电力电子装置用适当的数学模型来表示,要求这个模型有足够的精确度,使仿真结果能够以足够的精确度反映被仿真系统的运行特性,但这个模型也不能太复杂,以至于难以在计算机上实现或计算时间过于冗长;第二部分是编制实现仿真的计算机程序,在这个过程中要选择适当的数值计算方法,使得在仿真过程中不出现太大的计算误差,要求有足够高的编程技巧,使编写的程序有足够高的可靠性和快速性;第三部分是对仿真程序的正确性进行实验验证,这在一个仿真程序刚编写完成,要正式使用它的时候是必不可少的,只有在有足够实验证明这个仿真程序的仿真结果是可靠的之后,才能放心地应用这个程序的仿真结果。

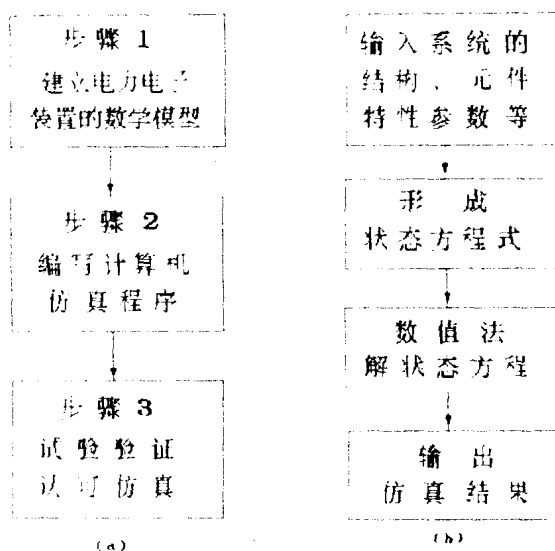


图 1-3 仿真过程与仿真程序结构

(a) 仿真过程; (b) 仿真程序结构

仿真程序的测试与实验验证方面的内容已超出本书范围,本书主要阐述仿真过程的第一和第二部分,即电力电子装置模型的建立和仿真程序的编写。在图 1-3b 中给出了仿真程序的基本结构。如图所示,大部分仿真程序都由以下四个基本环节构成,即输入环节,建立平衡方程环节、数值法解平衡方程环节以及仿真结果输出环节。

通过输入环节,计算机从用户获得有关仿真对象的结构、元件的参数、元件的特性以及初始状态等方面的信息。这些信息可以通过键盘等设备以对话或交互绘图的方式输入,在要输入的内容较多而且也相对固定的情况下,也可以部分或全部地采用输入文件的形式输入,即将所要输入的信息预先贮存在一个磁盘文件上,仿真程序通过读取这个磁盘文件来获得所需的信息。在很多的情况下,输入文件是另一个程序建立的,或者说是另一个程序的输出文件,即另一个程序将计算结果存放在一个磁盘文件上,这个文件直接被仿真程序的输入环节读入作为仿

真的输入数据。如应用电磁场分析和电机参数计算软件可以获得电机的参数,这些软件将计算所得的电机参数存放在一个磁盘文件上,在仿真程序的输入环节中只要给出这个文件的名字,仿真程序就可在磁盘上找到并读取这个文件从而获得所需的电机参数,大大地减少对话的内容。

在第二个环节中,计算机自动地根据输入的被仿真系统的结构、元件的参数和特性等信息,应用电路的基本定律,即基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律和支路定律,形成描述系统运行过程的平衡方程,这些方程中可能有代数方程、线性微分方程或非线性微分方程等。在形成平衡方程时,应设法尽量减少同时解的方程的个数,形成平衡方程的过程将随着所选择的仿真方法的不同而不同,在以后各章中将详细讨论。

在接下来的环节中,计算机用适当的数值计算方法解上述平衡方程。这里涉及到适当的数值计算方法的选择问题,应根据平衡方程的特点选择不同的数值解法。以微分方程的数值解法为例,可供选择的有矩阵指数函数法、龙格-库塔法、预测-校正法等众多的方法,各种方法有它不同的特点和不同的适用范围,选择适当的方法不仅可以提高结果的精确度,而且可以改善程序的快速性。在进行电力电子装置的计算机辅助分析时遇到的平衡方程的最大特点是这些方程多为刚性方程组,或者说被分析的系统各时间常数在数量级上相差很大。因此在选择数值计算方法时首先必须考虑的是所选择的方法是否满足刚性稳定条件。数值算法在程序编好之后就定下来了,但也可以在同一个程序中准备几种不同的解法,由计算机根据被分析系统的特点来选用。

最后一个,但不是最不重要的一个环节,是仿真结果的输出环节。通过这个环节仿真程序的用户获得他所要求的答案。在大多数的情况下,仿真结果不是一个或几个数据,而是一大批,若直接将这些数据从屏幕或打印机上输出来,用户就得花很多的时间对这些数据进行分析整理。明智的方法是将这些数据按照一定的格式存在一个磁盘文件(即仿真程序的输出文件)上,然后通过调用其它程序来对这些数据进行分析处理。如可以通过调用绘图程序将仿真结果以曲线或图表的方式输出,或通过调用谐波分析程序对仿真结果进行谐波分析,等等。这样若将仿真程序视作为被仿真的系统,则绘图程序和谐波分析程序分别相当于示波器和谐波分析仪。

上述四个环节是仿真程序的基本环节,这些环节在每一个仿真程序中都是必不可少的。此外,为了改善仿真程序的性能,还要在仿真程序中加上一些其它的环节。如为了节省计算时间和提高仿真精度,可以在程序中加上仿真步长的自动选择和优化环节(这在解刚性方程组时尤为重要);又如在进行系统的稳态分析时,为了省去由于初始条件给得不适当而引起的达到稳态之前的冗长的暂态仿真过程,可在程序中加上稳态运行点直接寻找环节,等等。

第二章 半导体开关元件的模型

相对于普通的有触点开关而言,半导体开关称为静态开关,它是一种利用半导体元件的特性来导通和关断电流的无触点开关。

在开始对一个系统进行计算机辅助分析时首先必须建立它的模型。而在电路的计算机辅助分析中常用到的有两类模型,即电路模型和数学模型,电路模型用由基本电路元件构成的一个电路来等效装置或器件的外部特性;数学模型则用数学表达式来描述装置或器件的运行特性。计算机能够直接接受的只有数学模型,建立电路模型是为了便于得到所要分析的系统的数学模型,它可被看作是从实际的系统到它的数学模型之间的一个过渡。

半导体开关元件是一些复杂的非线性元件,用电路模型来完整、精确地描述它们的特性一方面是很难作到的,另一方面将导致很复杂的数学模型,致使解数学模型所需的计算量大幅度增加。在进行电力电子装置的计算机辅助分析时,通常人们所感兴趣的是电力电子装置作为一个整体的特性,而不是开关元件单个器件的特性,因此经常采用的是一些结构很简单的电路模型,这些模型能够反映半导体开关元件在导通时呈低阻状态、关断时呈高阻状态等基本特性,或者说这些电路模型只包含了半导体开关元件的一级效应,半导体开关元件的二级效应如电荷存储效应、元件由于过流或过压而损坏等等则可通过另一个模型,即开关元件的逻辑模型来描述。通过电路模型和逻辑模型的配合使用来完整地描述开关元件的各种一级效应和二级效应。

这一章将介绍半导体开关元件的电路模型和逻辑模型,为此将首先就目前常用的半导体开关元件的特性作一简单的复习。

§ 2-1 常用开关元件的特性

图 2-1(a) 所示为一理想开关元件,图 2-1(b) 是它的 $v(i)$ 特性,称为开关元件的理想静态特性曲线。由图 2-1(b) 可见,当理想开关导通时,不论通过它的电流多大,它两端的电压降总等于零;当它关断时,不论它两端的电压多大,通过它的电流总等于零。因此理想开关元件本身不消耗能量,它的效率为 100%。半导体开关元件的实际静态特性曲线越接近于上述理想静态特性曲线,它的效率就越高。

尽管各种半导体开关元件如二极管、三极管、晶闸管等都能实现导通和关断电流的开关功能,但它们之间是有差别的,除了制造工艺的不同外,它们的特性也各不相同。为便于记忆可以用“开关函数”来描述各种开关元件的主要特性,开关函数由开关元件以下两方面的特性构成:

(1) 静态特性,用理想静态特性曲线来表示。半导体开关元件的理想静态特性曲线由图 2-1(b) 所示曲线的二到三条分支构成;

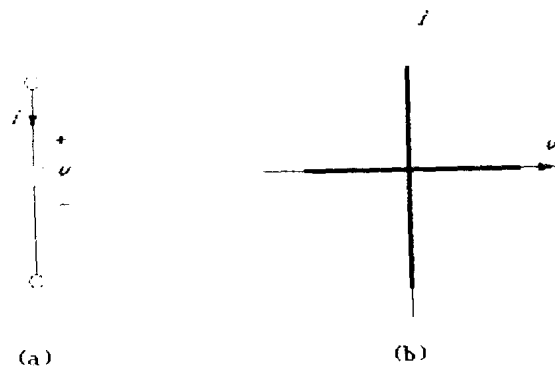


图 2-1 理想开关元件

(2) 动态特性, 主要描述开关元件从理想静态特性曲线的一个分支过渡到另一个分支的过程是否可控。

一、二极管

二极管是由一个 PN 结构成的半导体元件, 因此是最简单的单向导通元件, 如图 2-2(a)。

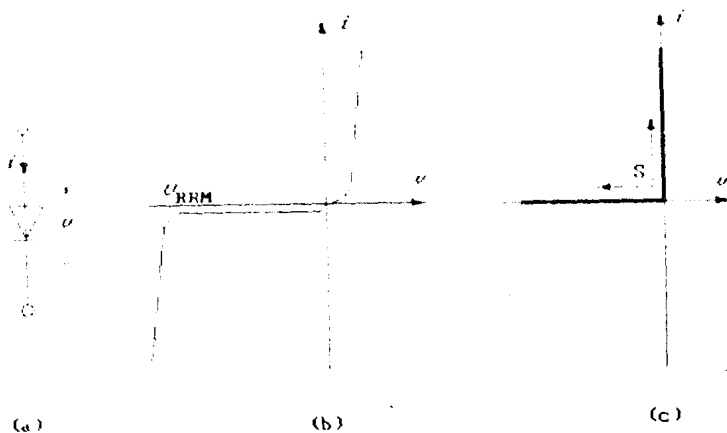


图 2-2 二极管

(一) 静态特性

图 2-2(b) 是二极管的静态特性曲线。在正向上, 当电压超过阈值电压 (对于硅二极管约为 0.5V) 时, 电流急剧增加, 而电压的变化则十分微小。对于硅二极管而言, 当导通时它的阳极—阴极之间的正向电压降约为 1V 左右, 这相对于变电器的工作电压来说一般是很小的。在反向, 二极管一般总是处在关断状态, 当反向电压增加到一定数值时, 反向漏电流增加较快, 再继续增大反向电压, 将导致二极管的反向击穿而损坏。

二极管的主要极限参数有:

浪涌电流 I_{FSM} : 由于电路异常而引起的并使结温超过额定结温的不重复性最大通态过载电流;

通态平均电流 I_O : 二极管所能承受的工频正弦半波电流在一个周期内的平均值;

反向电流 I_R : 二极管未击穿时的反向漏电流;

反向重复峰值电压 V_{RRM} : 二极管所能承受的反向重复性瞬时值电压;

导通电压降 V_{rW} ; 二极管导通时的正向电压降。

(二) 动态特性

动态特性描述二极管从导通到关断和从关断到导通的过程。

为使一个原先导通的二极管关断, 首先应使通过它的电流降到零, 然后在它的端部加上反向电压。图 2-3 给出了二极管从导通到关断的整个过程中电压和电流的波形。电流下降的速率 di/dt 是由外部电路决定的, 在时刻 t_0 二极管中的电流降到零, 但这时二极管并没有关断。由于二极管导通时在其中积累的电荷不会马上消失, 电流在过零之后将以同样的斜率反方向增大, 直到时刻 t_1 二极管中积累的电荷基本上消散完毕, 二极管重新具有了关断的能力, 反向电流开始减小。由于外部电路一般是感性的, 电流斜率符号的变化在二极管的端部引起一个反向过电压。在时刻 t_2 , 反向电流下降到一个很小的数值, 二极管的端部就只剩下外部电路强加的反向电压。

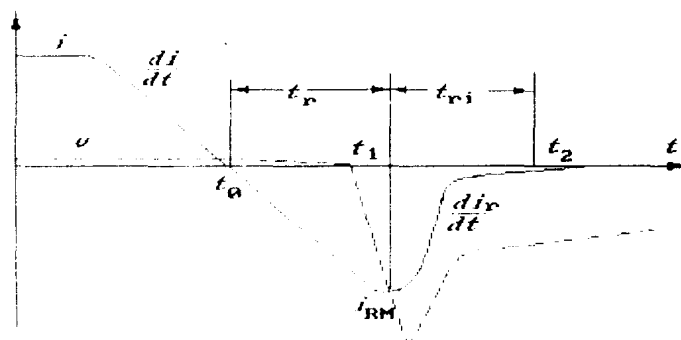


图 2-3 二极管的关断过程

关断过程中最重要的参数是二极管的恢复时间 $t_{off} = t_r + t_{ri}$, 普通二极管的恢复时间为几个微秒, 某些快速二极管的恢复时间为 100 毫微秒。

二极管在关断过程中出现的反向过电压的大小决定于反向恢复电流的变化率 di_r/dt 和外部电路的电感。当这个过电压较大时, 应在二极管的端部并联一个阻容保护电路。

对于二极管来说, 从关断到导通的这个暂态过程相对地说不十分重要, 当它端部出现大于阈值电压的正向电压时它就导通, 但其间有一个比恢复时间 t_{off} 小得多的开通时间 t_{on} 。

(三) 开关函数

若略去二极管导通时的正向压降和关断时的反向漏电流, 则图 2-2(b) 所示的二极管和静态特性可以简化为图 2-2(c) 所示的理想静态特性, 图中 δ 表示二极管从导通到关断和从关断到导通的过程是自发的, 是不可控制的。

二、晶闸管

晶闸管是一种 PNP 结构的半导体元件, 它由三个 PN 结构成。如图 2-4(a) 所示, A 代表晶闸管的阳极, K 表示阴极, G 表示门极或控制极。

(一) 静态特性

当晶闸管控制极电流 $i_g = 0$ 时, 它的静态特性如图 2-4(b) 所示。当晶闸管端部所加正向电压小于一个最大值 V_{DM} 时, 它基本上是非导体, 处于关断状态; 而当所加正向电压大于 V_{DM} 时, 由于雪崩效应晶闸管进入导通状态, 此后, 只有当电流 i 降低到小于维持电流 I_H 时, 晶闸管才

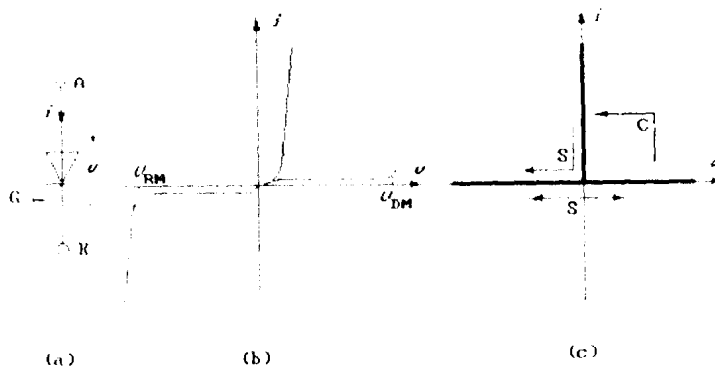


图 2-4 晶闸管

能重新回到关断状态。当晶闸管端部所加反向电压不超过最大反向电压 V_{RM} 时,它总处于关断状态。

如上所述,当 $i_g = 0$ 且端部所加正向电压大于 V_{DM} 时,晶闸管被触发。而当 $i_g \neq 0$ 且所加正向电压大于另一个值 V_{dm} ($< V_{DM}$ 时) 时,晶闸管也被触发而进入导通状态。 V_{dm} 的大小与 i_g 的大小有关, i_g 越大, V_{dm} 越小。当 i_g 大于某个值 i_{gM} 时, V_{dm} 将降到最小值 V_{dmin} , 这时晶闸管的正向静态特性与二极管相似,但由于晶闸管是由多个 PN 结构成,它导通时的阳极—阴极电压降将较二极管大(约为 1 至 2V)。

由此可见,晶闸管的触发是可以控制的,只要其端部所加正向电压小于 V_{DM} 且大于 V_{dmin} ,通过向控制极输送一个大于 i_{gM} 的电流,晶闸管就进入导通状态。然而晶闸管的关断是不可控制的,只有当晶闸管中的电流降到小于维持电流 I_H 时,它才进入关断状态。

晶闸管的主要极限参数与二极管相同,除此之外还有:

维持电流 I_H : 使晶闸管维持导通状态所需的最小正向电流;

门极触发电流 I_{or} : 使晶闸管由关断转入导通所必须的最小门极电流。

(二) 动态特性

通过向端部承受正向电压的晶闸管的控制极送一个电流脉冲来使之导通。与二极管相似晶闸管从关断进入导通需要一段开通时间 t_{on} , 对于小功率晶闸管这个时间约为 1 微秒,而大功率晶闸管的开通时间会达到 5 微秒。影响开通时间 t_{on} 大小的主要因素有门极触发电流 i_g 的幅值及其上升沿的陡度,以及晶闸管阳极—阴极电流的上升率 di/dt 等。但当 di/dt 太大而阳极—阴极电压的下降不够快时,晶闸管有可能由于过热而烧坏,因此应主要通过改善触发电流 i_g 的波形来减小 t_{on} 。

晶闸管由导通到关断是一个由外部电路决定的不可控制的过程。为使一个原先导通的晶闸管关断,首先必须使其中的电流降到零,然后在它的端部加上一个能够持续一定时间的反向电压。晶闸管关断过程中电压和电流的波形如图 2-5 所示。在外部电路的作用下晶闸管中的电流在 t_0 时刻降到零,与二极管相似地,由于电荷存储效应晶闸管这时并未关断,晶闸管中的电流将以由外部电路决定的变化率反方向增大,直到时刻 t_1 , 反向电流的变化率迅速改变符号,反向电压开始出现在晶闸管的端部,这时与二极管的关断过程相似地,由于外部电路多为感性的,电流的迅速变化将在晶闸管的端部引起过电压。图中从电流过零的时刻 t_0 至晶闸管重新具

有关断能力的时刻 t_2 的这段时间 t_q 称为晶闸管的关断时间。根据关断时间 t_q 的定义, 若在 t_2 时刻之前晶闸管端部的电压重新变成大于零, 即晶闸管的加反向电压的时间 t_{inv} 小于关断时间 t_q , 则由于晶闸管这时仍未恢复关断能力, 它将重新导通。由图可见, 晶闸管的关断时间 t_q 由 t_r 和 t_{ng} 两部分构成, t_r 是晶闸管中反向偏压的 PN 结的恢复时间, 约为几个微秒; t_{ng} 是控制极的恢复时间, 约为数十到几百个微秒。 t_q 的大小与电流变化率 di/dt 、反向电压的大小、结温以及重新出现的正向电压的变化率 dv/dt 有关。 dv/dt 是晶闸管的另一个动态参数, 当 dv/dt 大于限定值时会引起关断的晶闸管的误导通。在晶闸管的阳极和阴极之间并联一阻容电路一方面可以限制晶闸管关断时产生的过电压, 另一方面可以限制 dv/dt 的大小。

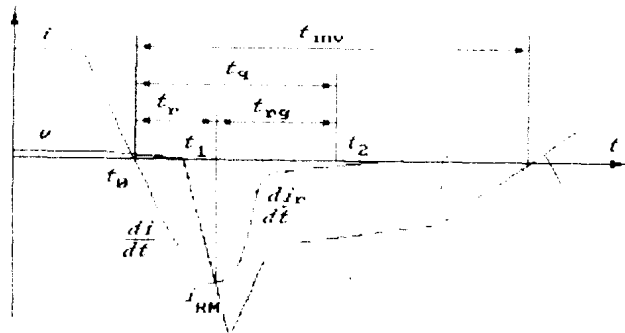


图 2-5 晶闸管的关断过程

(三) 开关函数

若略去晶闸管的导通电压降和关断漏电流则它的静态特性可简化为图 2-4(c) 所示的由电压轴和正电流半轴构成的理想静态特性。晶闸管的导通是可以控制的, 即从正电压半轴到正电流半轴的过渡是可控的, 图中用 C 表示; 而从正电流半轴到负电压半轴以及两电压半轴间的过渡都是自发的, 不可控的。

三、三极管

三极管是一种 NPN 或 PNP 结构的半导体元件。电力电子电路中用的大功率三极管多为 NPN 结构。

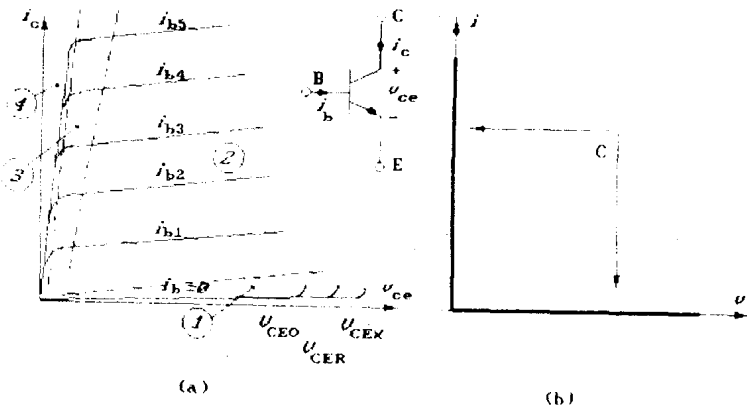


图 2-6 三极管的特性

(一) 静态特性

图 2-6(a) 给出了大家所熟悉的三极管静态输出特性 $v_{ce}(i_c)$, 它可被划分为四个不同的工