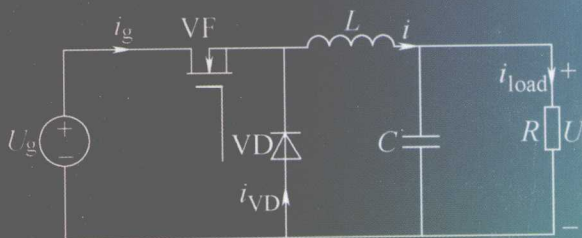


电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎陈亚爱 编著

开关变换器 的实用仿真 与测试技术

KAIGUAN BIANHUANQI DE SHIYONG
FANGZHEN YU CESHI JISHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

开关变换器的实用仿真 与测试技术

陈亚爱 编著



机械工业出版社

本书系统地论述了开关变换器模型、控制方面的基本原理和实用设计方法、基本仿真和实验测试技术,以及开关调节系统设计中的仿真与测试技术的应用。主要内容有:DC-DC 变换器模型,开关变换器控制系统,仿真软件简介,开关变换器仿真模型及其应用,开关调节系统的测试技术。

本书内容丰富、新颖、系统、实用,反映了 20 世纪 90 年代以来国内外学术界、工程技术界在该领域取得的主要研究成果和最新进展。

本书可作为高等工科电类专业研究生、高年级本科生的教材或教学参考书,也适用于从事开关电源工程设计和开发的研究人员、工程技术人员使用与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

开关变换器的实用仿真与测试技术/陈亚爱编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 11

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-28688-2

I. 开… II. 陈… III. 开关-变换器 IV. TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 201713 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孙流芳 责任编辑:王 欢 版式设计:张世琴

封面设计:马精明 责任校对:李秋荣 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 20 印张 · 388 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-28688-2

定价:45.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主 任：王兆安

副主任：白继彬 牛新国 徐德鸿 杨 耕

委 员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈 坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康 勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨 耕	杨 旭	余岳辉	张 波
张承慧	张为佐	张卫平	张 兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周 波	周维维	查晓明

秘书组：陈守良 刘进军 孙流芳 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来,使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化,同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前,电力电子技术仍以迅猛的速度发展着,新的电力电子器件层出不穷,新的技术不断涌现,其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国,电力电子技术都已造就了一个很大的产业群,如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业,这个产业群就更加庞大了。与之相应,在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大,且与日俱增。因此,组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍,以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考,成为眼下的迫切需要。

在20世纪80年代,电力电子学会曾和机械工业出版社合作,出版过一套电力电子技术丛书,那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近,电力电子学会经过认真考虑,认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此,成立了专门的编辑委员会,负责确定书目、组稿和审稿工作,向机械工业出版社推荐,仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

1. 本系列图书属专题论著性质,选题新颖,力求反映电力电子技术的新成就和新经验,以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际,以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格,作者都是在电力电子技术第一线工作的专家,且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于阅读学习。

本系列图书编委会中,既有一大批国内资深的电力电子专家,也有不少已崭露头角的青年学者,其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助,并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

序

开关调节系统是一个带有闭环控制的强非线性时变系统，其建模、控制、仿真以及实测技术一直是电力电子学研究领域的重要内容之一。这方面的理论与技术也是电力电子与电力传动专业研究生、电类本科生以及从事开关电源研究与开发的工程技术人员必备的基础知识。为满足国内高校开设开关变换器建模与控制研究生课程的需要，2006年我编著了《开关变换器的建模与控制》一书，陈亚爱副教授作为第二作者，也参与了该书的编写工作。目前，该书已被国内多所高校选作研究生教材，并于2008年被评为北京市精品教材。但到目前为止，尚未见到系统介绍开关变换器仿真与实测技术方面的教材，相关的文献也很少。而对开关变换器频率响应特性和系统稳定性的测试法是研究和设计开关调节系统必不可少的重要方法，是验证和分析开关变换器稳态和动态特性的重要手段。为此，编著一本适合研究生和电类高年级本科生使用的、满足课程实践性教学需要的教材，又能满足工程技术人员需要的参考书，是很有必要的。

陈亚爱副教授长期从事开关调节系统的建模、控制、仿真以及实测技术的研究工作，深入系统地研究了近年来公开发表的论文、软件的使用和相关网站上的内容，形成了自己独特的知识体系结构，也提出了一些实用的方法。所编著的《开关变换器的实用仿真与测试技术》一书对开关变换器的建模、控制、仿真与测试技术的各方面知识作了系统的论述，主要工作有：①在建模方面，重点讨论了非理想变换器的模型，给出了CCM和DCM下的小信号精确模型，并用实验和仿真的方法验证了模型的正确性；②根据20世纪90年代以来在控制技术方面取得的研究成果，分析和归纳总结了开关变换器的各种控制技术的特点和适用场合，对常用的电压控制、电流控制、单周期控制等技术和相应的控制系统设计作了详细的介绍，通过实例给出了系统的设计方法和步骤；③给出了开关变换器的各种仿真模型和应用实例，较为系统和全面地论述了开关调节系统中仿真软件的应用技术；④由于开关调节系统的环路增益测试是在高噪声背景的小信号扰动条件下进行的，要想获得准确的测量数据有很大的难度，该书系统地介绍了开关调节系统中主要元器件参数的测量和开关变换器频率响应的测试技术，为从事开关电源设计的工程技术人员、研究人员和在校的研究生提供了开关变换器实用测试方法。

总之，该书题材新颖，内容丰富、系统、实用，反映了国内外学术界、技

VI

术界以及工程界近三十年在该领域取得的最新进展和主要研究成果，是一部实用的教材和参考书。

张卫平

2009 年 12 月 1 日于北方工业大学

前 言

电源是所有用电设备的动力来源。电源的形式多种多样,开关电源是其中的一种。它以高效率、高可靠性能、小型化和轻型化的特点已成为各类电子设备所应用的主流电源。

开关变换器是开关电源的核心部分。开关调节系统是一个带有闭环控制的强非线性时变系统,不能直接应用经典控制理论进行分析和设计。因此,自20世纪80年代以来,开关变换器的建模、控制、仿真与实测技术一直是电力电子学研究领域的重要内容之一。它也是电力电子与电气传动专业研究生及电类本科生必备的基础知识。2003年作者成功地参与了“北京市高等教育精品教材建设项目”——《开关变换器的建模与控制》,作为该书的第二作者参与编著工作。目前我校已连续四年将其作为研究生教材使用,反映很好。2008年6月,《开关变换器的建模与控制》一书再次印刷,并被评为北京市精品教材。但是,到目前为止,尚未见到系统地介绍开关变换器仿真与实测技术方面的教材,相关的文献介绍也不多见。然而,研究开关变换器的频率响应测试法,尤其是研究确保系统稳定性的测试法对开关调节系统的设计和运行具有非常重要的意义。但是与开关变换器频率响应相关的研究论文大都集中在理论和建模方面,很少涉及确保系统稳定性的测试方法方面。因此,编著一本适合研究生和本科高年级学生使用的侧重工程训练的相关教材,同时又能满足从事开关电源设计的工程技术人员和研究人员需要的参考书,是很有必要的。

开关变换器的仿真技术和实测技术是分析、验证开关变换器稳态和动态特性的重要手段。本书将主要采用OrCAD/PSpice等仿真软件系统地介绍开关变换器的实用仿真技术和测试技术,力图反映20世纪90年代以来国内外科技界、工程界在这个研究领域里取得的最新进展和主要研究成果。围绕这一目标,本书的第1章介绍开关变换器的模型,在介绍理想开关变换器模型的基础上,着重介绍非理想开关变换器的模型,为后续章节的仿真与实测技术的介绍打下基础;第2章介绍开关变换器的控制系统和控制技术;第3章介绍目前常用的仿真软件以及使用方法;第4章是关于开关变换器仿真模型及其应用的内容,针对常见开关变换器,建立相应的PSpice动态模型,使用通用的仿真程序分析开关变换器开环、闭环动态特性等;第5章在介绍测量基础知识和相关测试设备的基础上,重点介绍了开关变换器主要技术参数的测试方法。本书采用国外的仿真软件,软件中的图形符号与文字符号不符合IEC与我国标准,请读者注意。

在本书的构思和策划过程中，北方工业大学机电工程学院、机械工业出版社、北方工业大学张卫平教授、李正熙教授等单位和个人给予了大力支持和帮助。在成书过程中，北方工业大学绿色电源实验室、北方工业大学北京市电力电子与电气传动工程研究中心提供了实验研究设备和场所，在此工作的刘元超、陈振更、周京华以及研究生李卫海等同志付出了辛勤的劳动。另外，本书是北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目（PHR（IHLB））^①。在此谨向上述单位和个人表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中一定有疏漏和不妥之处，敬请前辈、同仁以及广大读者见谅并不吝赐教。在本书的编写过程中，作者参考的大量文献资料已在书后的参考文献中列出，在此作者对参考文献的作者们致以衷心的感谢。

作 者

2009 年 11 月 28 日于北方工业大学

① PHR（IHLB）：Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing Municipality。

目 录

序

前言

第 1 章 DC-DC 变换器模型 1

1.1 概述 1

1.2 连续导电模式下 DC-DC 变换器模型 2

1.2.1 大信号动态电路分析 2

1.2.2 DC-DC 变换器的交流模型 14

1.3 连续导电模式下非理想变换器模型 28

1.3.1 大信号动态电路分析 28

1.3.2 大信号动态电路模型 30

1.3.3 直流等效电路 33

1.3.4 交流小信号等效电路 34

1.3.5 交流小信号等效电路分析 35

1.4 断续导电模式下 DC-DC 变换器模型 41

1.4.1 用状态空间平均法为 DCM 下变换器建模 42

1.4.2 直流与交流小信号等效电路 47

1.4.3 交流小信号等效电路分析 49

1.5 断续导电模式下非理想变换器模型 51

1.5.1 大信号动态电路模型 52

1.5.2 连续导电模式与断续导电模式边界的确定 57

1.5.3 直流等效电路 58

1.5.4 交流小信号等效电路 60

1.5.5 DCM 下的交流小信号等效

电路分析 61

1.6 调制器模型 70

1.7 小结 71

第 2 章 开关变换器控制系统 74

2.1 开关变换器控制技术概述 74

2.1.1 传统控制技术 74

2.1.2 新型控制技术 77

2.1.3 数字控制技术 80

2.1.4 模拟控制和数字控制的优势与不足 82

2.2 电压控制型开关调节系统 83

2.2.1 电压控制型开关调节系统的组成及基本工作原理 83

2.2.2 电压控制器设计 84

2.2.3 电压控制型 Buck 变换器的分析与研究 90

2.2.4 系统的动态和稳态分析模型 97

2.2.5 一个实际的电压控制型开关调节系统实验 98

2.3 电流控制型开关调节系统 100

2.3.1 平均电流控制型开关调节系统 102

2.3.2 峰值电流控制型开关调节系统 110

2.3.3 双环控制型开关调节系统的分析与研究 140

2.3.4 一个实际的双环控制型开关调节系统实验 145

2.4 其他控制型开关调节系统 147

2.4.1 概述 147

2.4.2 电荷控制 147

2.4.3 单周期控制 156

2.5 小结	159	性能仿真	207
第3章 常用仿真软件简介	161	4.5.2 峰值电流控制型开关调节 系统性能仿真	218
3.1 概述	161	4.6 仿真技术在开关调节系统设计 中的应用举例	224
3.2 Mathcad 软件和使用简介	162	4.6.1 电压型 Buck 电路控制器的 复频域综合	224
3.3 MATLAB 软件简介	165	4.6.2 用根轨迹技术为 Buck 变换 器设计数字控制器	229
3.4 Micro-Cap 软件简介	168	4.6.3 仿真技术在开关调节系统 设计中应用的其他实例	236
3.5 OrCAD/PSpice 软件简介	169	4.7 小结	245
3.6 Saber 软件简介	171	第5章 开关调节系统的测试技 术	246
3.7 仿真软件的主要分析类型	172	5.1 测量的基本知识	246
3.7.1 直流分析	172	5.1.1 测量的定义和方法	246
3.7.2 交流小信号分析	172	5.1.2 测试技术	247
3.7.3 噪声分析	172	5.2 常用开关调节系统测量仪器 简介	248
3.7.4 瞬态分析	173	5.2.1 Agilent4395A 网络/阻抗/频 谱分析仪	248
3.7.5 灵敏度分析	173	5.2.2 数字示波器	249
3.7.6 允许偏差(容差)分析	173	5.2.3 LCR 测试仪	249
3.7.7 不同温度分析	173	5.3 元器件参数测量	250
3.8 小结	173	5.3.1 电容元件参数测量	251
第4章 开关变换器仿真模型及 其应用	175	5.3.2 电感元件参数测量	253
4.1 连续导电模式下的平均开关 仿真模型	175	5.3.3 场效应晶体管开通电阻 测量	257
4.1.1 平均开关模型	176	5.3.4 二极管参数测量	258
4.1.2 CCM 下平均模型在 OrCAD /PSpice 中的建模	178	5.4 开关变换器频率响应的测试 方法	259
4.2 组合型 CCM/DCM 平均开关仿 真模型	180	5.4.1 研究测试法的意义	259
4.2.1 组合型 CCM/DCM 平均开 关模型	180	5.4.2 测试设备和测试信号的注 入方法	260
4.2.2 组合型 CCM/DCM 模型 在 OrCAD/PSpice 中的建 模	185	5.4.3 开关调节系统环路增益的 测试	261
4.3 CPM 仿真模型	186	5.4.4 变换器输出阻抗的测试	269
4.4 开关变换器开环特性的仿真	190	5.5 小结	270
4.4.1 OrCAD/PSpice 用户库的 制作方法	190		
4.4.2 开环特性仿真	201		
4.5 开关调节系统性能的仿真	207		
4.5.1 电压控制型开关调节系统			

附录	272	测量铝电解电容器频率特性	
附录 A OrCAD/PSpice 10.0 安		的方法	284
装	272	附录 D Agilent4395A 分析仪的操	
附录 B Agilent4395A 分析仪功率源		作	290
的数值与相应电压关系	282	参考文献	303
附录 C 用 Agilent4395A 分析仪扩频			

第 1 章 DC-DC 变换器模型

1.1 概述

DC-DC 变换器的作用是进行能量传递与变换，其直流电压的变换包括幅值变换和极性变换。为了实现能量传递和变换，开关变换器是由采样网络、控制器、脉宽调制（PWM）环节、驱动器等控制电路组成系统闭环运行。该系统称为开关调节系统，它是一个高阶、离散、非线性、时变的病态系统。

鉴于开关调节系统的特点，欲建立这个系统的精确数学模型，从理论上得到瞬态响应的精确解析表达式是很困难的。近 20 年来，国内外学者为求解这个系统做了大量的研究，并取得了许多有实际工程意义的成果。求解的主要研究思路是：根据系统主电路在一个开关周期内分成几个分段线性网络的特点，建立分段线性状态方程，在此基础上，以系统的实际工作为依据，对系统进行适当的简化，得到能满足工程要求的近似解^[1]。

目前，较为典型的分析方法有，状态空间平均法、离散时域法等。在上述两类方法基础上，又可分成以下几种方法：

1) 大信号分析法。考虑系统的非线性特性，用求解非线性系统的方法进行分析，如相平面法、数字仿真法和各种基于数字控制器的先进控制算法等。

2) 小信号分析法。假设扰动信号很小，并且扰动信号的频率比开关频率小得多，在直流工作点（平衡点）附近线性化，将非线性方程近似为线性方程。然后应用经典控制理论中分析线性系统的基本方法分析和设计系统，得出系统在平衡点附近有小信号扰动时的近似瞬态特性及系统的稳定性等。

因此，研究开关调节系统的交流低频小信号的动态性能是十分重要的。为了能在复频域内分析和设计开关调节系统，本书主要采用小信号分析法。为此，本章主要介绍开关变换器的建模，1.2 节和 1.4 节分别介绍理想开关变换器连续导电模式（CCM）和断续导电模式（DCM）下的模型；为了获得与实际电路更为接近的模型，1.3 节和 1.5 节分别讨论在考虑开关器件导通损耗和储能元件串联等效电阻的情况下，非理想开关变换器 CCM 和 DCM 的模型；在 1.6 节中对调制器进行了分析，建立了调制器模型。

1.2 连续导电模式下 DC-DC 变换器模型

DC-DC 变换器的模型按其传输信号的不同,可分为稳态模型、大信号模型和小信号模型。其中,稳态模型适用于求解变换器稳态时的工作点,大信号模型适用于仿真或研究大信号扰动下的瞬态特性,而小信号模型则适用于交流小信号作用下变换器的动态特性^[2]。下面主要介绍大信号分析和小信号模型。

1.2.1 大信号动态电路分析

开关变换器在启动或关闭、负载突增或突减、电源电压突升或突降等工况时,系统在大信号扰动下工作,此时系统是强非线性,因此小信号分析法不再适用。开关调节系统实质上是一个处理能量变换和进行能量控制的系统。能量的突变是系统不可避免会遇到的工况,它对系统运行构成潜在的危害,处理不当会使系统不稳或损毁。能量的突变也是系统经常会遇到的工况^[1],因此本小节对系统在大信号扰动下的瞬态特性通过仿真实验加以介绍。

1. 开关变换器启动过程分析

Buck (降压) 变换器的结构是开关变换器中最基本的拓扑结构之一,因此,以 Buck 变换器作为研究对象,来研究开关调节系统开环运行时的启动过程。所谓开环运行是指控制器输出的占空比 D 在整个启动过程中为常数,系统各储能元件的初始值为零,输入电压为单位阶跃函数,即 $u_g(t) = U_g \times 1(t)$ 。Buck 变换器理想等效电路如图 1-1 所示,其中 MOSFET (VF) 的开关周期是 T_s ,开通时间为 t_{on} ,占空比为 D 。

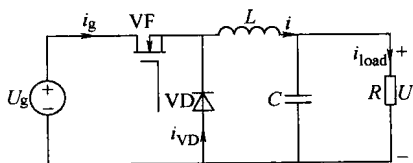


图 1-1 理想 Buck 变换器等效电路

仿真实验的理想 Buck 变换器参数为: 输入电压 $U_g = 23.0\text{V}$, 滤波电容 $C = 370\mu\text{F}$; CCM 下动态电感 $L = 66.64\mu\text{H}$, 负载 $R = 4\Omega$, 输出电压 $U = 11.4\text{V}$ 。

用 MATLAB 仿真软件构建理想 Buck 变换器仿真模型如图 1-2 所示。图 1-3

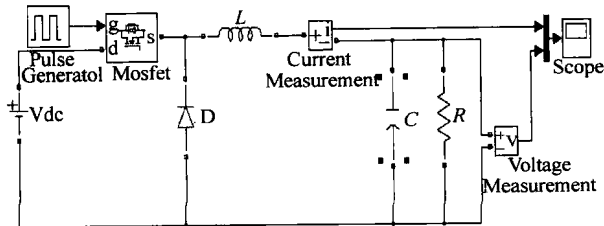


图 1-2 理想 Buck 变换器启动时的仿真模型

所示为理想 Buck 变换器开环启动运行的瞬态响应曲线，曲线 1 为输出电压 $u(t)$ 瞬态响应，曲线 2 为电感电流 $i_L(t)$ 瞬态响应。

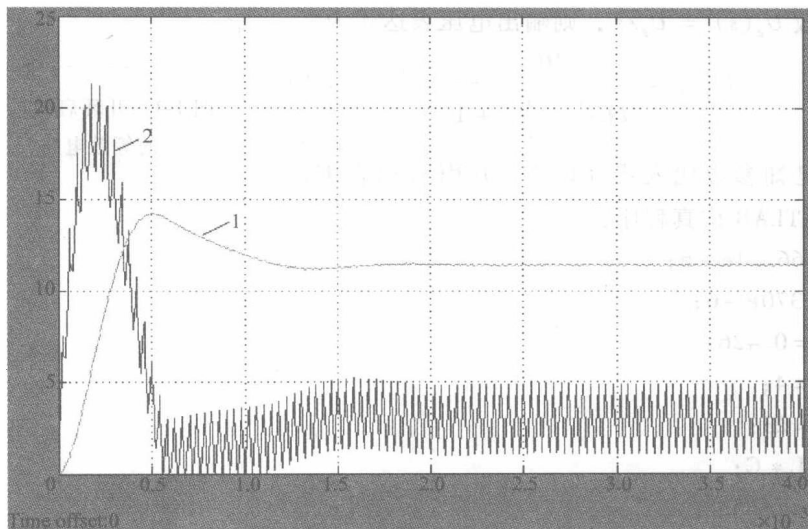


图 1-3 理想 Buck 变换器启动响应曲线

1—输出电压 2—电感电流

仿真实验测得 Buck 变换器的一些主要时域指标：上升时间 $t_r = 223.5 \mu\text{s}$ ，调节时间 $t_s = 1.65 \text{ms}$ ，超调量 $\sigma = 25.15\%$ ，上冲电压 $\Delta U = 2.8667 \text{V}$ ，最大峰值电压 $U_{\max} = 14.2667 \text{V}$ ，最大峰值电感电流 $i_{L\max} = 21.270 \text{A}$ ，稳态时的平均电感电流 $i_{L\text{av}} = 2.85 \text{A}$ 。

由理想 Buck 变换器启动过程的仿真实验可得到如下结论：

1) 电压过高，过冲电压是稳态值的 25.15%。实际中，一般要求过冲电压低于稳态值的 10%，仿真结果不符合实际要求的原因在于主电路和控制电路的工作时序问题。仿真中的工作时序是控制电压已正常工作、输出的占空比为稳态的情况下，然后启动主电路，使过冲太高。而正常的工作时序应是主电路先于控制电路启动，控制电路中含有软启动电路或控制策略，使开关调节系统在满足调节时间指标的前提下，占空比从零逐渐增大，直至进入稳态。因此，采用软启动和主电路启动先于控制电路启动的措施，能减小输出电压过冲，确保系统安全启动。

2) 电感电流的峰值过高，过高的峰值电流可能会使电感铁心处于饱和，严重时烧坏主电路。实际中，可增加限流保护电路或增设电流反馈环。

如果用 1.2.2 节将要介绍的交流小信号分析法来分析开关变换器的启动过程，情况又将如何呢？见下面的分析和仿真实验。

按交流小信号分析法，CCM 下 Buck 变换器开环启动过程等效电路如图 1-4

所示。对于同一变换器，其参数不变（同上），并设电路中的储能元件的初始值为零，输入电压为阶跃函数 $U_g(s) = U_g/s$ ，则输出电压表达式为

$$U(s) = \frac{DU_g}{LCs^2 + \frac{L}{C}s + 1} \quad (1-1)$$

将已知参数代入式（1-1），并用 C 语言编制如下 MATLAB 仿真程序：

```
L = 66.64e-6;
C = 370e-6;
R1 = 0.426;
R2 = 4;
Ug = 23;
a = L * C;
b1 = L/R1;
b2 = L/R2;
D = 0.49565;
num = D * Ug;
den1 = [a b1 1];
den2 = [a b2 1];
step(num, den1)
hold on
step(num, den2)
```

将上述程序在 MATLAB 环境下运行后，可得图 1-5 所示的启动过程中输出电压瞬态响应曲线，图中输出电压曲线 1 和 2 的负载电阻 R 分别为 4Ω 和 0.426Ω 。

对照图 1-3 和图 1-5 所示的输出电压曲线可以得出如下结论：

1) 在 Buck 变换器参数相同的情况下，但由于采用不同的分析方法，得到不同的瞬态响应。第二种分析方法即小信号分析法具有局限性，这种方法没有考虑主电路开关的非线性，也没有考虑控制电路中的脉宽调制器的非线性饱和特性。因此，小信号分析结果不能预测大信号扰动下系统工作的实际特性。

2) 在储能元件相同的条件下（见图 1-5 曲线 1 和 2），即电感 L 和电容 C 参数一定的情况下，负载不同，则阻尼比 ξ （或品质因数 Q ）不同，超调量也不同。在本例仿真实验中，当 $R = 4\Omega$ ， $\xi = 0.053$ ， $Q = 9.425$ ， $U_{\max} = 21V$ ；当 $R = 0.426\Omega$ ， $\xi = 0.5$ ， $Q = 1.004$ ， $U_{\max} = 13.2V$ 。

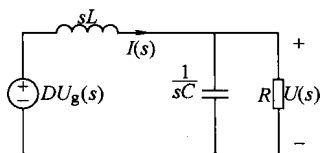


图 1-4 开环启动过程的等效电路

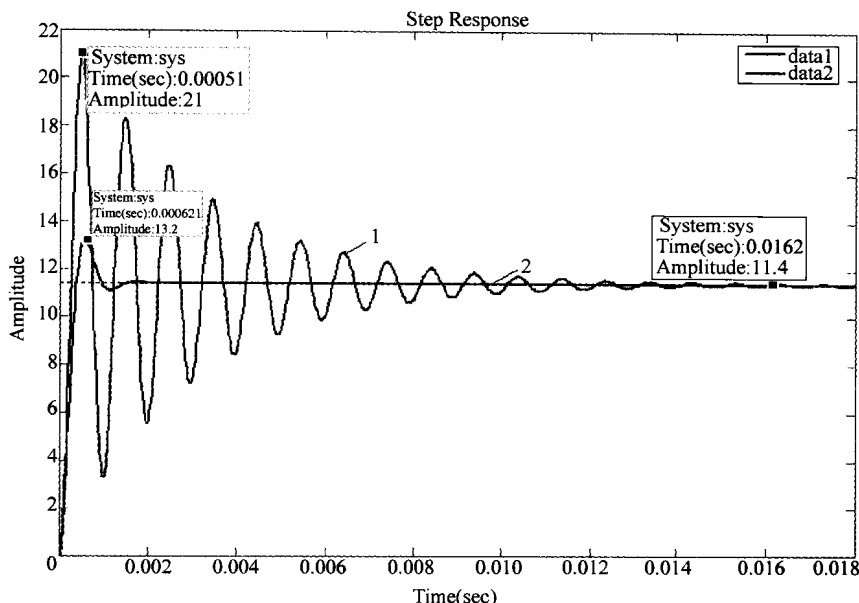


图 1-5 启动过程中输出电压瞬态响应曲线

1— $R=4\Omega$ 时的输出电压 2— $R=0.426\Omega$ 时的输出电压

2. 开关调节系统启动过程分析

在开关调节系统的动态性能指标中,输出电压在大信号条件下暂态过冲和恢复时间通常被认为是最重要的指标^[3]。在 GB/T 14714—2008《微小型计算机系统设备用开关电源通用规范》中对输出电压为 12V 的电源指标规定如下:暂态恢复时间最大值应小于 50ms,过冲幅度为 +10%,电压稳定度为 1.5%。下面通过仿真实验说明闭环调压系统的启动过程。

理想 Buck 变换器参数:输入电压 $U_g = 23.0\text{V}$,滤波电容 $C = 370\mu\text{F}$;CCM 下动态电感 $L = 66.64\mu\text{H}$,负载 $R = 4\Omega$,输出电压 $U = 11.4\text{V}$,采用线性反馈,反馈系数 $h = 1$, $D_{\max} = 0.9$, $D_{\min} = 0$ 。按电源技术指标规定的要求,本例中超调量: $\sigma = 10\%$;调节时间: $t_s = 50\text{ms}$ 。

在 MATLAB 仿真环境下,闭环启动仿真模型如图 1-6 所示,其中闭环启动仿真模型中的采样频率为 100kHz,开关频率为 25kHz。输出电压和电感电流的瞬态响应曲线如图 1-7 所示。仿真实验测得闭环调节系统启动过程的一些主要时域指标:最大峰值电压 $U_{\max} = 15.12\text{V}$,上冲电压 $\Delta U = 3.72\text{V}$,调节时间 $t_s = 1.5\text{ms}$,超调量 $\sigma = 32.63\%$,最大峰值电感电流 $i_{L\max} = 27.1\text{A}$,稳态时的平均电感电流 $i_{L\text{av}} = 2.85\text{A}$ 。

对照图 1-3 和图 1-7 可得到如下结论:

1) 输出电压和电感电流的变化规律相同,因此可用开环开关变换器近似地