



ELSEVIER
爱思唯尔

The Chinese Editions are intended for sale
in PRC only and not for export, which is prohibited.

国外机电类优秀图书系列

开关模式功率转换器 设计与分析

► **Switch-Mode Power Converters**
Design and Analysis

[美] Keng C. Wu 著

陈继忠 许春艳 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



开关模式功率转换器 设计与分析

Donald A. Meyer, Professor, Pennsylvania State University
University Park, Pennsylvania

© 2009 Wiley-Interscience, Inc.

清华大学出版社
Tsinghua University Press

国外机电类优秀图书系列

开关模式功率转换器设计与分析

Switch-Mode Power Converters Design and Analysis

[美] Keng C. Wu 著

陈继忠 许春艳 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书通过一种解析求解开关模式功率转换器电路的新方法,对开关模式功率转换器进行了深入探讨,并给出相应的仿真分析、验证和理论推导。本书系统论述了开关模式功率转换器的三种基本拓扑结构、推挽式结构、电流反馈、谐振转换器及其派生类型和 AC-DC 功率因子校正等问题,亦涉及了开关驱动器、误差放大器和反馈隔离电路等保证开关模式功率转换器可靠运行的支持电路。

本书可作为高等院校电力电子、电气工程和自动化等专业大学本科、研究生教材及科研与教学参考书,也可供从事开关电源、UPS 和变频器等电力电子产品及电子变压器设计的科研和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

Switch-Mode Power Converters Design and Analysis, First Edition

Keng C. WU

ISBN-10: 0120887959 ISBN-13: 978-0120887958

Copyright © 2006 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN-10: 981-259-782-4 ISBN-13: 978-981-259-782-3

Copyright © 2007 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Publishing House of Electronics Industry under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pet Ltd.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由电子工业出版社与 Elsevier (Singapore) Pet Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港特别行政区及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-6086

图书在版编目(CIP)数据

开关模式功率转换器设计与分析 / (美) 乌(Wu, K.C.) 著; 陈继忠, 许春艳译. —北京: 电子工业出版社, 2007.9
(国外机电类优秀图书系列)

书名原文: Switch-Mode Power Converters Design and Analysis

ISBN 978-7-121-04951-4

I. 开… II. ①乌… ②陈… ③许… III. 开关—功率—转换器 IV. TM571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 135560 号

责任编辑: 朱清江

印 刷: 北京机工印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 19.5 字数: 321 千字

印 次: 2007 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前言

开关模式功率转换器的设计是一个非常严肃的问题，必须予以高度关注。与大多数现有教科书所涵盖的内容有所不同，本书广泛地采用了数学推导，例如，推导了具有电容滤波器的带载全波整流器导通时的解析解。许多读者第一眼看到这些公式时有可能会对此失去信心，但是在这类问题上没有捷径可走。在此，我真诚地恳请诸位读者耐心地读完本书，您将得到深厚的回报。

本书深入探讨了涵盖三种基本形式在内的转换器的拓扑结构：降压（Buck 式，顺向式）、升压（Boost 式）和升降压（返驰式）式；推挽式；电流反馈；谐振转换器及其派生类型，以及 AC-DC 功率因子校正等问题。在不同的工作条件下，开关模式功率转换器既可以工作在连续导通模式（CCM），也可以工作在非连续导通模式（DCM）。功率转换器的工作状态可以在这两种模式间瞬时随意切换。对于这些转换器的闭环控制，采用两种基本模式控制：电压模式控制和电流模式控制。通常认为电流模式控制具有更好的控制性能。电流模式控制又可细分为均值电流控制和峰值电流控制。除谐振转换器采用频率调制外，大多数开关模式转换器采用脉宽调制。除主要工作机制外，尚需采用许多支持电路以保证功率转换器可靠运行，其中包括开关驱动器、误差放大器和反馈隔离电路等。

本书的内容按照一种固定模式进行叙述。首先确定 CCM 和 DCM 工作状态下的稳态输出与控制变量（在 PWM 情况中的占空比，或谐振情况下的频率）的关系。通过分析 CCM 模式中周期循环的电流波形，析取此波形的几何特性，确定临界电感，此电感值成为 CCM 和 DCM 工作模式的分界点。

已知每种工作模式的控制方法，就可以建立起相应的稳态解析输出表达式，其中包含有反馈量、误差放大器、PWM 增益（或频率调制增益）和功率级。在某些不考虑损耗的简化条件下，可以给出显式输出表达式。当需要考虑损耗时，获得显式表达式的愿望是非常不切实际的，应该放弃这种想法，进而采用隐函数和雅可比行列式分析输出敏感度和调整率。

获得稳态解后，分析两种控制模式中的小信号 AC 稳定性问题。基于平均模式法（R. Middlebrook 博士提出），推导并验证电压控制模式回路的稳定性表达式。

电流模式控制就是在原均值模式中添加一个电流回路增益。本质上, R.Middlebrook 博士的平均模式法就是电流模式控制的有效扩展。

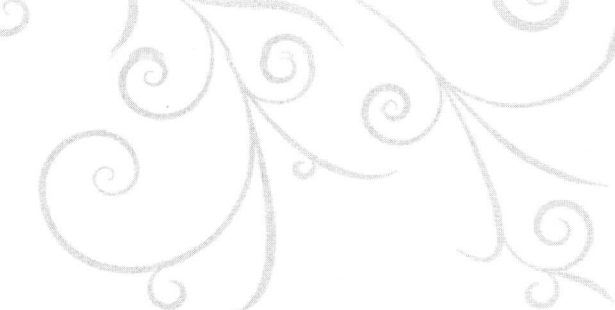
本书对时域中的加速稳态分析法也进行了介绍。加速稳态分析法将状态连续性概念和转换器的周期稳态输出联系在一起。在进行分析时, 使用了两种方法: 拉普拉斯变换法和状态转换法。后者涉及特征值、特征矢量以及指数矩阵等与系统论相关的矩阵理论。

现在, 仿真技术几乎在所有的研究领域都扮演着重要角色, 在功率转换器的设计中也不例外。本书采用的仿真方法明显地不同于商业化的图形仿真, 而是采用更加基础的仿真分析方法。前者常常面临收敛的问题, 而后者恰恰规避了这些难点。

本书是写给那些已经对开关模式功率转换器基础比较了解的, 希望进一步研究的人员, 也适合于本科、研究生和从事电气工程的专业人士使用。特别是状态转换技术的应用, 将使学习过线性代数的科研和技术人员备受鼓舞。

致 谢

向 Burlington, MA 的 Elsevier 公司高级策划编辑 Charles B. Glaser 及其同事；
英格兰 Elsevier（股份）有限公司制作总监 Annie Martin；SPI 出版服务公司的文字编辑 Sheryl Avruch、排版工人及其全体职员表示由衷的感谢！

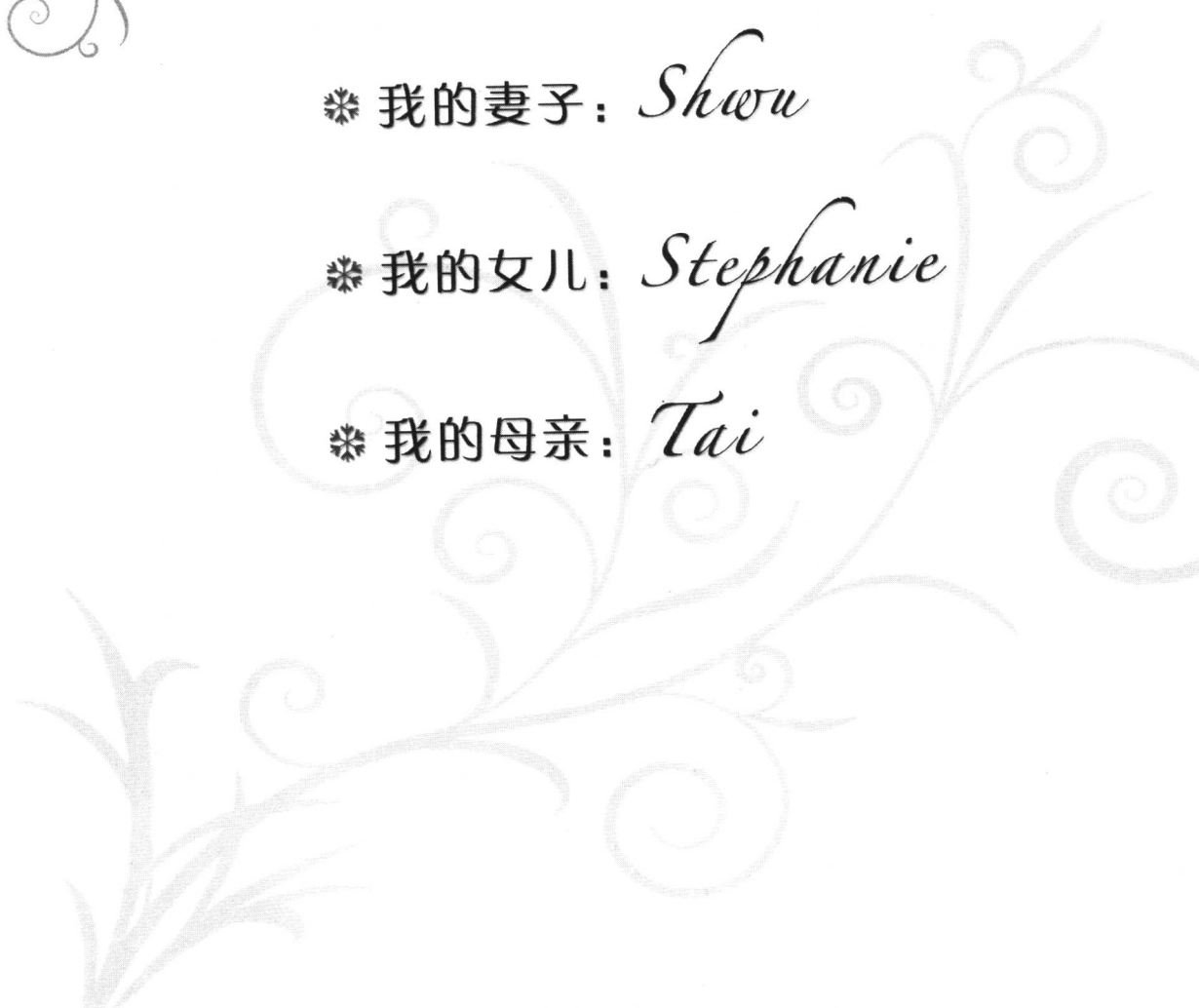


谨以此书献给

✧ 我的妻子：Shwu

✧ 我的女儿：Stephanie

✧ 我的母亲：Tai



译者前言

开关模式功率转换器通过电力电子器件构成的电路拓扑结构实现电能转换。开关模式功率转换器在推动科学技术的发展中发挥了重要作用,近年来发展十分迅速。对于那些已经掌握了开关模式功率转换器基础知识,正不断探索研究现代电源设计的高校师生和工程技术人员,迫切需要系统的、理论性强的学习参考资料。这便是电子工业出版社引进并翻译出版此书的用意所在。

《开关模式功率转换器设计与分析》与大多数现有电力电子技术类书籍所涵盖的内容有所不同,本书未就电力电子器件及众多功率变换电路拓扑结构的基本原理做出详细阐述。该书通过大量的数学推导,建立起开关模式功率转换器两种工作模式下的稳态解析输出表达式,分析两种控制模式中的交流小信号稳定性问题,广泛地使用了矩阵、线性代数、隐函数和雅可比行列式等理论,使得其他方法不能得到的功率级增益成为可能。本书在注重学科体系完整性的前提下,以严谨的科学态度对理论推导进行了仿真与验证。

本书内容丰富,理论推导详实,适合于那些已经对开关模式功率转换器基础比较了解的,希望进行进一步研究的读者。书中的公式、图表的表现方式均以原著为准,力求在保持原书的规范性、严谨性和实用性的基础上,通过恰当的语言,将原著丰富的精神和内容传递给读者。

本书的作者——Keng C. Wu 作为洛克希德·马丁公司海洋系统与传感器工程部的领导成员,在电路设计分析、系统建模、大尺度系统动态研究、电力电子的测试与集成方面具有丰富的经验。

在翻译过程中,得到了电子工业出版社的大力支持和帮助,也得到了译者所在单位的许多同志的支持和帮助,在此对他们致以衷心的感谢!

本书的翻译专业性强,参加翻译和校对的主要人员虽然尽心竭力,但是由于能力和精力有限,译文的不足和错漏之处在所难免,希望广大专家和读者予以批评指正。

陈继忠

2007年8月

目 录

第 1 章 隔离型降压 (Buck) 转换器	1
1.1 CCM 的开环输出和占空比的确定	2
1.2 DCM 的开环输出和占空比的确定	4
1.3 CCM 与 DCM 的转换和临界电感	5
1.4 非理想运算放大器的增益公式	6
1.5 电压模式控制反馈	7
1.6 电压型 CCM 的闭环回路	9
1.7 电压型 DCM 的闭环回路	10
1.8 电压型 CCM 中小信号的稳定性	11
1.9 电流模式控制	15
1.10 闭环稳态中的 CCM 电流模式控制	17
1.11 CCM 电流模式控制中的小信号稳定性分析	18
1.12 输出电容的量值与加速稳态分析法	20
1.13 一个完整实例	27
1.14 状态转换技术	35
第 2 章 具有电流模式控制和斜率补偿功能的推挽转换器	40
2.1 中心抽头推挽转换器的功率级	40
2.2 不连续导通模式的工作原理	42
2.3 连续导通模式的工作原理	49
第 3 章 具有均值电流模式控制的非隔离型顺向转换器	53
3.1 均值电流的反馈	53
3.2 占空比的确定	56
3.3 稳态闭环回路	57
3.4 闭环回路的调整与输出敏感度	57
3.5 小信号的回路增益及稳定性	58
3.6 举例	59

3.7 状态转换技术	60
第4章 移相式全桥转换器	65
4.1 功率级的工作原理	66
4.2 倍流滤波器	66
4.3 稳态占空比	67
4.4 稳态输出波形	67
4.5 稳态输出波形举例	72
第5章 电流反馈型推挽转换器	74
5.1 重叠连续导通模式	75
5.2 重叠连续导通模式的稳态描述	78
5.3 重叠连续导通模式举例	80
5.4 非重叠连续导通模式	82
5.5 负载电流的均分与并行工作状态	84
5.6 使用状态空间平均法分析 AC 小信号	88
5.7 状态转换技术	91
第6章 隔离型返驰式转换器	93
6.1 DCM 占空比的确定	93
6.2 CCM 占空比的确定	95
6.3 临界电感	95
6.4 电压型 DCM 的闭环控制	96
6.5 电压型 DCM 中的小信号稳定性	96
6.6 电压型 CCM 的闭环控制	97
6.7 电压型 CCM 的小信号稳定性	98
6.8 峰值电流型 DCM 的闭环控制	98
6.9 峰值电流型 DCM 的小信号稳定性	99
6.10 峰值电流型 CCM 的闭环控制	100
6.11 峰值电流型 CCM 的小信号稳定性	101
6.12 输出电容	102
6.13 加速稳态输出	104
6.14 一个完整的 DCM 实例	106

第 7 章 非隔离型升压转换器	116
7.1 占空比的确定	117
7.2 临界电感	117
7.3 在 CCM 中峰值电流型闭环控制的稳态特性	118
7.4 在 CCM 中峰值电流型小信号的稳定性	118
7.5 在 DCM 中峰值电流型闭环控制的稳态特性	119
7.6 在 DCM 中峰值电流模式的小信号的稳定性	119
7.7 DCM 的输出电容值	120
7.8 CCM 的输出电容值	121
第 8 章 准谐振转换器	122
8.1 工作过程	122
8.2 数学分析	123
8.3 稳态闭环控制及其稳定性	128
8.4 设计问题	130
8.5 举例与难题	131
第 9 章 E 类谐振式转换器	132
9.1 稳态的初始状态	134
9.2 时域稳态解	140
9.3 闭环 DC 分析	142
9.4 闭环 AC 分析	144
9.5 II 型放大器	146
9.6 举例	148
9.7 讨论	155
第 10 章 AC-DC 功率因数校正电源	157
10.1 基本定义	157
10.2 单相单级非隔离型升压 PFC	159
10.3 输出电容的大小	160
10.4 DCM 升压电感的选择	162
10.5 CCM 升压电感的选择	166
10.6 高功率 PFC 和负载的分配	167
10.7 浪涌保护	170

10.8	负载短路保护	172
10.9	三相 PFC	173
第 11 章	误差信号放大器	184
11.1	放大器的种类	184
11.2	控制回路的固有相位	187
11.3	II 型放大器的实现	188
11.4	III 型放大器的实现	190
11.5	实现 II 型放大器的例子	191
第 12 章	支持电路	193
12.1	双极开关驱动器	193
12.2	MOSFET 开关驱动器	197
12.3	损耗缓冲器	199
12.4	无损耗缓冲器	201
12.5	隔离式反馈	201
12.6	软启动	203
12.7	负电荷泵	204
12.8	具有 RC 滤波器的单相全波整流器	206
12.9	占空比的压制	211
第 13 章	状态空间平均法与 Cuk 型转换器	215
13.1	状态空间平均法	215
13.2	一般程序	217
13.3	举例: Cuk 转换器	217
第 14 章	仿真技术	224
14.1	压控顺向转换器的动态方程	225
14.2	压控顺向转换器的导通	229
14.3	压控顺向转换器的稳态	231
14.4	放大观察稳定状态	233
14.5	压控顺向转换器的瞬态负载	233
14.6	峰值电流控制型顺向转换器的动态方程	237
14.7	仿真峰值电流控制的顺向转换器	240
14.8	状态转换技术: 加速稳态法	250

第 15 章 电能的质量和完整性	255
15.1 元器件和工作条件的容差	256
15.2 DC 输出调节和最坏情况分析	257
15.3 电源输出的纹波和噪声	258
15.4 电源输出的瞬态响应	260
15.5 频率和谐波含量的定义	261
15.6 控制回路的带宽	264
15.7 阶跃响应的测试	266
15.8 带宽和稳定性	267
15.9 电磁谐波的发射	270
15.10 电能质量	271
附录 A 用于顺向转换器电流检测的附加滤波	274
附录 B MathCAD 程序 (图 1.42 的稳态输出电压)	276
附录 C MATLAB 程序 (图 1.42 的稳态输出电压)	280
附录 D MathCAD 程序 (稳态检测电流的输出电压)	282
附录 E MATLAB 程序 (转换器的仿真)	287
附录 F 电容和电感	292
附录 G MATLAB 程序 (带有脉冲负载的输入滤波器)	294
参考文献	296

第 1 章 隔离型降压 (Buck) 转换器

图 1.1 给出的是隔离型降压 (Buck) 转换器功率级的最简形式。该功率级依据输出负载和滤波电感 L 的不同, 工作在两种特殊模式下: 连续导通模式 (CCM) 和不连续导通模式 (DCM)。在 CCM 中, 电感电流 (i) 总大于零。在 DCM 中, 电感电流在某个确定的时间段内为零。也可以这样理解, 在 CCM 中, 功率级在两种拓扑结构间切换, 而在 DCM 中, 功率级依次在三种拓扑结构间切换。

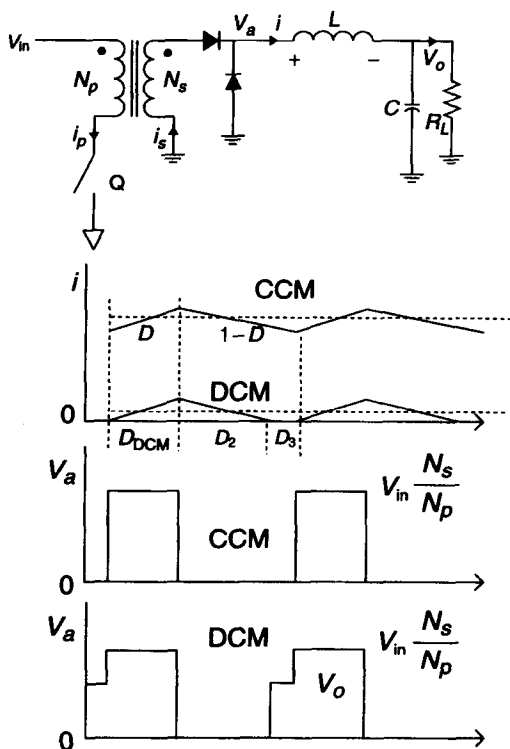


图 1.1 一个理想顺向转换器的功率级

压中的平均电压,并通过可变占空比 D 微调匝数比,从而调节输出电压。

然而,在推导(1.1)~(1.3)式的过程中,给出了一个有用的,但不切实际的假设。那就是,当整流二极管导通时,该二极管产生了一个零导通电压。在做出一些必要的修正前,应该首先放弃对理想二极管所作的假设。更确切地说,就是整流器的导通电压具有非零值—— V_D 。通过这个值,并且参考图1.2,将(1.1)~(1.3)式改写为:

$$\left(\frac{N_s}{N_p} V_{in} - V_D - V_o \right) D \cdot T_s + (-V_D - V_o)(1-D)T_s = 0 \quad (1.4)$$

$$D = \frac{V_o + V_D}{\frac{N_s}{N_p} V_{in}} \quad (1.5)$$

$$V_o = \frac{N_s}{N_p} V_{in} \cdot D - V_D \quad (1.6)$$

接下来考虑串联损耗问题,首先是变压器的次级损耗,然后是变压器的初级损耗。将次级损耗计入(1.6)式。(1.6)式给出的是由内阻为零的理想电源提供的电压。如果存在一个非零电源内阻 r_L ,则(1.6)式演化为:

$$V_o = \frac{N_s}{N_p} V_{in} \cdot D - V_D - r_L \cdot \frac{V_o}{R_L} \quad (1.7)$$

或者:

$$V_o = \frac{\frac{N_s}{N_p} V_{in} \cdot D - V_D}{1 + \frac{r_L}{R_L}} \quad (1.8)$$

此外,还应该注意到初级电阻的存在,其中包含有输入滤波器的串联电阻、变压器的初级绕组的电阻以及开关导通电阻。当变压器的初级绕组的电阻有一个脉冲电流流过时,输入滤波器的电阻内则流过一个DC电流。也就是说,将(1.8)式修正为:

$$V_o = \frac{\frac{N_s}{N_p} \left[V_{in} - \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{V_o}{R_L} (R_w + R_{on}) - \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{V_o}{R_L} \cdot D \cdot R_F \right] D - V_D}{1 + \frac{r_L}{R_L}} \quad (1.9)$$

需提醒读者注意的是,(1.9)式是 V_o 的隐函数,而且还是 D 的一个二次方程。