

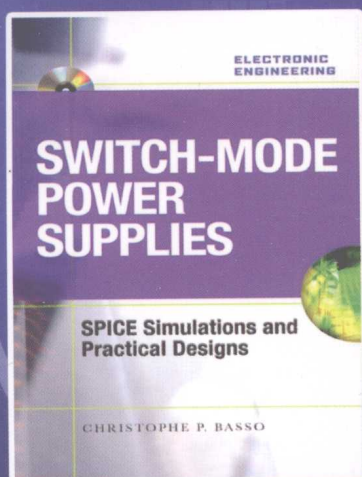
国外电子与通信教材系列

Mc  
Graw  
Hill

# 开关电源

## SPICE仿真与实用设计

Switch-Mode Power Supplies  
SPICE Simulations and Practical Designs



[法] Christophe P. Basso 著

吕章德 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

# 开关电源 SPICE仿真与实用设计

**Switch-Mode Power Supplies, SPICE Simulations  
and Practical Designs**

[法] Christophe P. Basso 著

吕章德 译

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书完整地论述了开关电源变换器的理论和仿真方法, 主要内容有: 电源变换器介绍、小信号模型、反馈和控制环、基本功能电路和通用模型、非隔离变换器前端整流和功率因数校正电路的仿真和设计、反激式变换器的仿真和设计、正激式变换器的仿真和设计。本书创建了多种市场上流行变换器的理论方程, 并给出了相应的 SPICE 模型, 提供了 600 多幅电路和仿真曲线插图, 为读者描述了完整的开关电源变换器理论和仿真设计方法。

本书的特色是对开关电源理论不进行过学术化的讨论, 只给出必需的理论方程推导, 同时通过大量实例介绍了仿真方法, 并提供了应用常用仿真软件, 如 OrCAD, ICAP/4,  $\mu$ Cap, TINA 等, 对这些开关电源变换器电路进行仿真的完整模型, 架起了理论分析和市场应用之间的桥梁。

本书可供从事开关电源仿真与设计的工程技术人员和电气信息类、自动化控制等相关专业高校师生参考。  
Christophe P. Basso, Switch-Mode Power Supplies, SPICE Simulations and Practical Designs.

ISBN 978-0-07-150859-9, Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2009.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签, 无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2008-3516

### 图书在版编目(CIP)数据

开关电源 SPICE 仿真与实用设计 / (法) 巴索 (Basso, C. P.) 著; 吕章德译. —北京: 电子工业出版社, 2009.5  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Switch-Mode Power Supplies, SPICE Simulations and Practical Designs

ISBN 978-7-121-08648-9

I. 开… Ⅱ. ①巴… ②吕… Ⅲ. 开关电源—电路设计—计算机仿真—应用软件—教材 Ⅳ. TN86-39 TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 058019 号

策划编辑: 谭海平

责任编辑: 张 溪

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

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: 787×1092 1/16 印张: 44.25 字数: 1132 千字

印 次: 2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 85.00 元 (含光盘 1 张)

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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

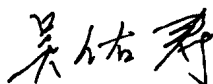
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报(英文版)》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

# 译 者 序

本书涉及两方面的内容——开关电源和电路仿真。就开关电源而言，它作为一种电子设备专用电源，极受当今工程技术人员所关注。开关电源以其轻、薄、小和高效率的特点为人们所熟悉，是各种电子设备小型化和低成本化不可缺少的一种电源方式，已成为当今电源的主流。与此相应，国内出版了许多介绍开关电源工作原理和设计的好书，大大方便了从事开关电源研究和设计的工程技术人员。但美中不足的是，这类书籍的内容往往过于学术化，里面包含了过多的理论分析推导，这使初涉开关电源设计领域的工作者望而却步。另外，这类书籍缺乏比较直观的、可供读者直接进行训练的手段。本书的另一内容是 SPICE 仿真。近十多年来，电力电子技术在国内外蓬勃发展，相应的仿真方法和软件也大量出现，并得到了广泛应用。国内也出版了很多关于 SPICE 仿真的书籍，但内容大多限于介绍仿真的方法及仿真软件的操作，图书中所涉及的仿真电路大都是比较常见的电路。这对于采用常规结构和参数、使用常用器件的成熟电路的仿真和设计是足够的，但对于涉及复杂电路的仿真，如开关电源电路的仿真，就远远不够了。本书很好地解决了这个问题。本书对开关电源的理论做了十分清晰但不复杂的分析推导，并给出了目前市场上流行的开关电源拓扑的 SPICE 模型及仿真结果，提供了多达 600 余幅插图，很好地搭起了理论和实际之间的桥梁，使初学者能很快通过书中实例，应用仿真方法来体会电路的奥秘。同时熟练的设计者能从书中找到许多设计和仿真过程中碰到的疑难问题的解决方法。

Basso 先生是安森美公司位于法国图卢兹分公司的工程部经理，他在 ac-dc 和 dc-dc 开关电源设计领域有独到的研究，是许多 PWM 控制器的研制者。他研制的 NCP120X 系列控制器已经成为离线电源的待机功率标准。SPICE 仿真是他的另一特长，他在 2001 年就编写了《开关电源 SPICE 仿真方法》一书，本书就是在该书的基础上，在许多方面进行了修改而成的。Basso 先生的 SPICE 仿真水平，通过书中大量的独特的电路 SPICE 模型及仿真结果曲线可以体会到。正如 Ray Ridley 博士在序中讲到的那样，Basso 先生是世界上电源 SPICE 仿真领域中的著名专家，本书应成为每个该领域工程技术人员必备参考书。

译者 1987 年毕业于清华大学电子工程系电子物理与激光专业，从 1996 年开始在绍兴文理学院从事教学工作，目前为物理与电子信息系教授，一直讲授“模拟电子技术”、“数字电子技术”、“通信电源”和“电子信息工程专业英语”等课程。在这些课程的教学过程中，逐渐熟练了 SPICE 仿真技术，并对开关电源设计也有一定的研究。到目前为止，发表了与光电器件和电路 SPICE 仿真相关的论文二十余篇，授权实用新型专利一项。Basso 先生的文章是译者一直认真研究的资料。当得知 Basso 先生出版新书的消息后，意识到此书对国内广大从事开关电源设计的工程技术人员而言，是一本非常难得的好书。译者主动与 Basso 先生取得联系，表示希望翻译此书，并得到了他的积极响应。在本书的翻译过程中，与 Basso 先生通过 E-mail 进行了多次交流，让译者从中受益匪浅。也希望本书让广大读者受益。

由于译者水平有限，错误之处在所难免，敬请读者指正。

吕章德  
2009 年 2 月

# 序

首先，来谈谈开关电源设计。这是一个很少能得到经费资助和专家关注、较冷门且很少有详细规划安排的领域。但许多高档商业产品出现故障的原因是电源系统设计不合理。这类产品的故障现在还在不断增加，使制造商和消费者受到极大的困扰。

虽然开关电源电路的形式很简单，而成功地设计制造电源却从来不是一件简单的或直接的工作，无论其他人是否同意这种说法。Basso 先生十分明白这一含义。在开关电源设计过程中，包含许多层次的设计细节，如果忽略它们，将会导致电源设计的失败。本书用了很长的篇幅来解释这些设计细节，这些解释对于电源设计者都是十分有用的。

受命设计第一个电源的电气工程师，经常会转向求助于自己熟悉的仿真工具。当然，在制作电源产品之前，看到熟悉的仿真波形对设计者而言是一个安慰。然而，这样做会产生很多问题。设计者不应简单地把电路图用 SPICE 或其他软件进行仿真，并希望仿真结果告知有关设计的很多有用信息。产品电路在尝试任何仿真之前必须要做仔细的修改。

Basso 先生清楚地解释了要得到期望结果所需的建模准则和进行电源仿真的不同方法。如果设计者从没有用过 SPICE，在开关电源设计之前，设计者应该努力吸收本书模型中包含的十分有价值的经验。Basso 先生是世界上电源 SPICE 仿真领域中的著名专家，他非常郑重地指出，实验室测试是必不可少的，未经验证的 SPICE 仿真结果是不能信赖的，仿真软件在设计过程中只能当做辅助工具。

电源设计一直是一个设计经验起重要作用的领域。没有一本书能从头到尾完整地解释各种应用下的电源设计过程。Basso 先生采用了很规范的方法来详细介绍电源变换器以及由个人经验所得的十分熟练的议题。如果设计者正在构建功率因数校正电路、正激和反激变换器或最常用的电源拓扑，在开始设计之前，应该留意借鉴 Basso 先生的聪明才智。密切注意 Basso 先生所提的关于半导体降额因子和安全工作区的建议。如果能把本书的这部分内容吸收到工业设计中，则电源故障的概率会大大下降。

我强烈为从初级到高级的各层次的电源设计者推荐本书。本书应是每个实验室的必备书籍。请阅读本书的每一页，运行每个仿真实例来完全理解 Basso 先生在书中所提的观点，吸收其有价值的建议，尽快开始在实验室测试所设计的电源。

Ray Ridley 博士  
Ridley 工程公司



# 前 言

本书在许多方面改写了《开关电源 SPICE 仿真方法》一书，因此，新书的题目中包括了“实用设计”。当我开始重写时，意识到目前市场上有许多介绍开关电源的书籍。然而，这些书或者过于学术化而没有与工业应用相联系，或者过于简单实际，而缺乏对设计实例中所使用的大多数公式进行基础理论的讨论。本书尝试去填补以上两者之间的空白，在理论分析描述和实际设计之间寻找平衡。例如，在第 3 章中，不仅描述了在许多相关教科书中可以找到的用运算放大器实现的补偿技术，还介绍了在目前电源市场上所流行的用工业标准 TL431 实现的补偿方法。因此，学生和设计工程师都可以在本书中找到相应的内容。有关分析的内容，公式的格式都采用了 IEEE 符号标准<sup>①</sup>，而在《开关电源 SPICE 仿真方法》一书中没有做到这一点。本书中所提出的模型要比前一本书中所采用的更好、描述也更透彻，同时考虑了一些读者给出的有关模型的观点。与前一本书一样，章节中的例子可在多种流行的 SPICE 软件中运行，为读者提供了从例子中学习并取得进步的简便方法。书中附带的光盘中包含了大量实例文件，而一些更复杂电路的文档另外提供。对于希望体验目前市场上仿真软件的读者，附带的光盘中包含了多种演示版本，如 PSIM、Transim、Tina、Multisim、Intusoft 以及其他一些有趣的软件包。

读者朋友们，我花费了大量的时间来编写本书，通常是在晚上，这几乎持续了三年时间。尽管在文字描述、方程推导及其他一些小的细节上用了全力，仍难免存在一些没能得到校正的拼写错误。希望读者通过我的网站指正，我的网站会经常更新，提供新的仿真模型以及一些完整库文件的信息，网址为 <http://pagesperso-orange.fr/cbasso.Spice.hem>。在此先向各位读者致谢。

我要真诚地感谢很多人。首先，要感谢亲爱的家庭成员，我的妻子 Anne，以及两个可爱的孩子 Lucile 和 Paul。在我面对仿真过程中出现的不收敛问题或面对空白稿纸而缺乏勇气时，他们经常要忍受我的情绪波动带给他们的困扰。我也要最诚挚地感谢亲爱的父母——Michele 和 Paul Basso。在我 14 岁时，是他们给我买了第一个电源，培养我对电子电路的兴趣，并付出了很多次跳闸的代价。我还要感谢我少年时期的老师，如来自 Clos-Banet Lycee 的 Rene Vinci 和 Bennard Metral，他们给我这样好动的学生慢慢地灌输热情和知识。就在那时，我在《Radio-Plans》(1982) 杂志上发表了我的第一篇文章。感谢我的朋友 Claude Ducros 和 Christian Duchemin，他们是该杂志的最后一任主编，现在这一杂志已经停刊。最后，感谢蒙彼利埃大学的 Claude Duchemin 指引我走上了开关电源之路。

本书的出版得到了许多人的帮助。在这些人中间，有安森美公司的同事兼朋友 Joel Turchi，感谢他与我做了许多次的讨论并为我审阅了全部书稿；我也很幸运地能经常与一起工作的团队成员进行讨论，他们是 Thierry Sutto、Nicolas Cyr、Stephanie Conseil 和 Francois Lhermite。我还要感谢市场部的朋友 Christophe Warin，他为我指出了许多拼写错误。

我的书稿审阅小组成员中包含了一些声望卓著的专家，我一直为能与他们一起工作而深感荣幸。我把他们的名字列在下面，真诚地感谢他们，感谢他们为审阅我的书稿花费了大量时间。

<sup>①</sup> 译著中公式采用了国家标准，而单位与参数的表示方法与原著一致。——编者注

Vatche Vorperian 博士, 工作于美国加利福尼亚的喷气推进实验室(JPL), 他激发了我对 PWM 开关的兴趣, 感谢他花费许多时间审阅了我的书稿。

Richard Redl 博士, 工作于瑞士的 Elfi, 多年来我参加了他组织的多个会议, 感谢他为我书稿的多个章节提出了很好的建议。

Ed Bloom, 工作于 e/j BLOOM 联合公司, 感谢他完整地审阅了我书稿的 dc-dc 设计一章。

Raymond Ridley 博士, 工作于美国 Ridley 工程公司, 首先感谢他很友好地为本书写了序, 然后感谢他为书稿的许多章节提供了很好的建议。

Ivo Barbi 博士, 工作于巴西圣卡塔琳娜州联合大学电力电子技术研究所。感谢他为本书章节的组织提供了很好的指导并为书稿做了许多校正。

Jeff Hall, Dhaval Dalal 和 Monsieur Mullett, 感谢他们为磁设计部分提供了两个附录。他们三位都工作于美国安森美公司。

Christian Zardini, 工作于法国 ENSEIRB 工程学校, 感谢他仔细地审阅了我的一部分书稿。

Franki Poon 和 S. C. Tan 博士, 他们分别工作于保和电力电子实验室有限公司和香港理工大学(中国), 感谢他们为我审阅了一些章节, 并非常感谢他们的书面建议。

Dylan Lu 博士, 工作于澳大利亚悉尼大学, 感谢他审阅了我书稿的第 1 章。

Arnaud Obin, 工作于法国 Lord 工程公司, 感谢他为反激式变换器一章的书稿提供了很好的建议。

V. Ramanarayanan 博士, 工作于印度班加罗尔的科技研究所电气工程部, 感谢他为书稿的目录提出了一些有趣的建议。

Jean-Paul Ferrieux 博士, 工作于法国格勒诺布尔电子技术实验室, 感谢他为书稿的功率因数校正一章提供了很多有益的建议。

Steve Sandler, 美国 AEi 系统公司咨询师, 感谢他在旅行过程中仔细地检查并编辑了书稿的其中几章。

Baloco 博士, 工作于法国安全电力系统公司, 感谢他审阅了正激式变换器一章的书稿。

Pierre Aloisi, 法国前摩托罗拉应用工程师和功率元器件专家, 感谢他为书稿中的电气和热应力部分提供了有趣的建议。

我还想感谢 Intusoft 软件公司的员工 Larry 和 Lise Meares, 以及他们的整个支持团队 (George、Farhad、Everett 和 Tim), 他们在本书大量例证电路的测试过程中为我提供了很大帮助。我还想感谢书中附带光盘中包含的仿真软件的作者们, 他们友好地同意我使用他们伟大的产品。

感谢 McGraw-Hill 出版社的 Steve Chapman, 为我提供了出版本书的机会。

最后, 感谢 Miller 一家, Noreen 和 Dteve, 没有他们巨大的帮助, 本书是很难出版的。他们很艰难地校正了我带有法文风格的英文书稿。

Christophe Basso

# 符 号 表

$A_e$	磁材料横截面面积
$BV_{DSS}$	漏源击穿电压
$B$	磁介质内感应磁通密度
BCM	边界导通模式
$B_r$	当磁场为零时剩余感应磁通密度
$B_{sat}$	$\mu_r$ 下降为 1 时的感应磁通密度
CCM	连续导通模式
CL	闭环
$C_{lump}$	电路中某点上存在的总电容
CRM	临界导通模式
CTR	光耦合器电流传输系数
$D$ 或 $d$	变换器占空比, 在 DCM 分析中也用 $d_1$ 表示
$D'$ 或 $d'$	占空周期中的截止时间 ( $d' = 1 - d$ )
$d_2, d_3$	DCM 条件下占空周期中的截止时间 $1 = d_1 + d_2 + d_3$
DT	死区时间
$D_0$	偏置点分析过程中的静态占空比
$\Delta I_L$	电感纹波电流峰-峰值
ESR	等效串联电阻
ESL	等效串联电感
$\eta$	变换器效率
$f_c$	交叉频率 ( $ T(f_c)  = 0 \text{ dB}$ )
$F_{sw}$	开关频率
$F_{line}$	输入电源频率
$G(s)$	补偿频率响应
$G_{f_c}$	所选交叉频率处的增益
$\phi$	磁介质中的磁通量
$\phi_m$	交叉频率 $f_c$ 处的相位裕度
$gm$	运算跨导放大器 (OTA) 的跨导
$H$	磁化力
$H_c$	使磁通密度回到零所需的矫顽磁场
$I_a, I_p$ 和 $I_c$	流入或流出 PWM 开关端点的平均电流
$I_C$	电容电流
$I_d$	二极管电流
$I_D$	MOSFET 漏极电流
$I_{in}$	变换器输入电流

$I_{in,rms}$ 或 $I_{ac}$	变换器输入电源的输入电流有效值
$I_L$	电感电流
$I_{mag}$	正激变换器磁化电感电流
$I_{out}$	变换器输出电流
$I_p$	基于变压器的变换器原边电流
$I_{peak}$	元件峰值电流
$I_{sec}$	基于变压器的变换器副边电流
$I_{valley}$	元件谷值电流
$k_D$	MOSFET $BV_{DSS}$ 降额因子
$K_d$	二极管 $V_{RRM}$ 降额因子
$l$ 、 $l_c$ 、 $l_m$	平均磁程长度
$l_g$	变压器空隙宽度
$L_p$	变压器原边电感（常用于反激式变换器）
LHP	左半平面零点（LHPZ）或极点（LHPP）
$L_{leak}$	原边测得的变换器总漏电感（所有输出端短路）
$L_{mag}$	变压器磁化电感（常用于正激式变换器）
$L_{sec}$	变压器副变电感
$M$	变换器变换比 $V_{out}/V_{in}$
$M_c$	电流模式变换器斜坡补偿
$M_r$	电流模式设计斜坡系数（表示为截止斜率的百分比）
$\mu_r$	相对磁导率
$\mu_i$	原点处磁化曲线斜率的初始磁导率
$\mu_0$	空气磁导率
$N$	用原变绕组归一化后的变压器匝数比，如 $N_p = 10$ ， $N_s = 3$ 则 $N = 0.3$
OL	开环参数，如增益、相位或输出阻抗
$P_{cond}$	元件导通损耗，即回路电阻和有效电流的平方的乘积
PF	功率因数
PFC	功率因数校正
$P_{out}$	变换器输出功率
PIV	二极管峰值反向电压
$P_{SW}$	元件开关损耗，即电流和电压的交叠区域
$Q$	滤波器品质系数或电量（库仑）
$Q_r$	二极管恢复阻断能力之前需要抽取的电荷
$Q_{rr}$	二极管总恢复电荷
$Q_G$	使 MOSFET 完全导通需要的电荷量
$r_{Cf}$	电容串联电阻，也表示为 ESR
$r_{Lf}$	电感串联电阻，也表示为 ESL
$R_{DS(on)}$	MOSFET 导通时的漏源电阻
rms	均方根
$R_{sense}$ 或 $R_l$	电流模式变换器检测电阻有时也称为负载电阻
RHP	右半平面零点（RHPZ）或极点（RHPP）

$S_a$ 或 $S_e$	外部斜坡补偿
$S_{on}$ 或 $S_1$	导通期间电感电流斜率
SEPIC	单端初级电感变换器
SMPS	开关电源
SPICE	集成电路通用模拟程序
$S_{off}$ 或 $S_2$	截止期间的电感电流斜率
$S_r$	当二极管阻断时, 外部施加的阻断斜率
$t_c$	整流二极管导通时间
$t_d$	集中电容放电时间
$t_{on}$	功率开关导通时间
$t_{off}$	功率开关截止时间
$t_{prop}$	控制器逻辑电路延迟时间
$t_{rr}$	二极管反向恢复时间
THD	总谐波失真
TVS	瞬态电压抑制器
$T(s)$	补偿环路增益
$T_j$	结温
$T_{sw}$	开关周期
$V_{ac}$ 、 $V_{cp}$	PWM 开关端点平均电压
$V_{bulk}$	集中电容两端电压
$V_{bulk,max}$ 或 $V_{peak}$	输入电压最大条件(忽略纹波)下的集中电容两端电压
$V_C$	电容两端电压
$V_{ce(sat)}$	双极型晶体管发射极和集电极之间的饱和压降
$V_{clamp}$	钳位电压
$V_{DS}$	MOSFET 漏源电压
$V_f$	二极管正向压降
$V_{GS}$	MOSFET 栅源电压
$V_{in}$	变换器输入电压
$V_{in,rms}$ 或 $V_{ac}$	输入有效电压
$V_L$	电感两端电压
$V_{leak}$	漏电感两端电压
$V_{min}$ 或 $V_{bulk,min}$	集中电容两端的最小电压
$V_{OS}$	RCD 钳位过冲电压
$V_{out}$	输出电压
$V_{peak}$	电压模式 PWM 锯齿斜坡峰值幅度
$V_p$	负载阶跃时的欠压脉冲响应峰值
$V_r$	基于变压器的变换器副边电压折算到原边的电压值
$V_{sense}$	电流模式变换器检测电阻两端产生的电压
$V_{ripple}$	纹波电压峰-峰值
$V_{RRM}$	二极管最大重复反向电压
$\zeta$	阻尼因子[容易与 $\xi$ (Xi) 相混]

# 目 录

第 1 章 电源变换器介绍 .....	1
1.1 电路真的需要仿真吗 .....	1
1.2 本书讨论的内容 .....	2
1.3 本书不讨论的内容 .....	2
1.4 用电阻变换电源 .....	3
1.5 用开关变换功率 .....	14
1.6 占空比因子 .....	21
1.7 降压变换器 .....	23
1.8 升压变换器 .....	33
1.9 降压-升压变换器 .....	44
1.10 输入滤波 .....	52
1.11 小结 .....	67
参考文献 .....	67
附录 1A RLC 传输函数 .....	67
附录 1B 电容等效模型 .....	70
附录 1C 电源按拓扑的分类 .....	73
第 2 章 小信号模型 .....	75
2.1 态空间平均 (SSA) .....	77
2.2 PWM 开关模式——电压模式 .....	88
2.3 PWM 开关模型——电流模式 .....	112
2.4 PWM 开关模型——寄生元件效应 .....	136
2.5 在边界导通模式下的 PWM 模型 .....	145
2.6 PWM 开关模型——电路集 .....	156
2.7 其他平均模型 .....	164
2.8 小结 .....	174
参考文献 .....	174
附录 2A 变换器基本传输函数 .....	175
附录 2B 极点、零点和复平面简介 .....	184
第 3 章 反馈和控制环 .....	189
3.1 观察点 .....	190
3.2 稳定判据 .....	193

3.3	相位裕度和瞬态响应	194
3.4	交叉频率选择	195
3.5	补偿网络构建	196
3.6	简易稳定性工具—— $k$ 因子	205
3.7	用 TL431 实现反馈	224
3.8	光耦合器	239
3.9	分流调节器	246
3.10	应用 PSIM 和 SIMPLIS 实现小信号响应	248
3.11	小结	253
	参考文献	253
	附录 3A 自动放置极-零点	253
	附录 3B TL431 SPICE 模型	257
	附录 3C 放大器类型 2 手动放置极-零点	260
	附录 3D 理解闭环系统中的虚地	263
<b>第 4 章</b>	<b>基本功能块和通用开关模型</b>	<b>267</b>
4.1	用于快速仿真的通用模型	267
4.2	运算放大器	268
4.3	具有给定扇出数的电源	273
4.4	可调无源元件产生的电压	275
4.5	磁滞开关	278
4.6	欠压锁定 (UVLO) 功能块	280
4.7	前沿消隐	281
4.8	具有磁滞作用的比较器	282
4.9	逻辑门	283
4.10	变压器	285
4.11	非稳态发生器	292
4.12	通用控制器	295
4.13	死区时间的产生	301
4.14	通用模型列表	303
4.15	收敛选项	304
4.16	小结	305
	参考文献	305
	附录 4A 磁件设计中所用术语的简明回顾	305
	附录 4B 为变压器模型提供物理值	311
<b>第 5 章</b>	<b>非隔离变换器的仿真和设计实践</b>	<b>317</b>
5.1	降压变换器	317
5.2	升压变换器	343
5.3	降压-升压变换器	365

参考文献	383
附录 5A 工作于非连续工作模式的升压变换器设计公式	383
<b>第 6 章 离线变换器前端的仿真和设计实践——前端电路</b>	<b>388</b>
6.1 整流桥	388
6.2 功率因数校正	404
6.3 BCM 升压 PFC 设计	444
6.4 小结	457
参考文献	457
<b>第 7 章 反激式变换器仿真和设计实践</b>	<b>459</b>
7.1 隔离降压-升压变换器	459
7.2 无寄生元件条件下的反激式变换器波形	462
7.3 含寄生元件的反激式变换器波形	464
7.4 无钳位作用时观察漏极信号	466
7.5 漏极电压偏移钳位	467
7.6 求 DCM 工作条件下的谷点	472
7.7 钳位网络的设计	474
7.8 双开关反激式变换器	485
7.9 有源钳位	488
7.10 反激式拓扑的小信号响应	496
7.11 反激式变换器的实际考虑	506
7.12 变换器的待机功率	524
7.13 20 W 单输出电源	528
7.14 90 W 单输出电源	542
7.15 35 W 多输出端电源	558
7.16 反激式变换器元件约束	574
7.17 小结	574
参考文献	575
附录 7A 通过波形求变压器参数	575
附录 7B 应力	577
附录 7C 90 W 适配器的变压器设计	579
<b>第 8 章 正激变换器的仿真和实践设计</b>	<b>584</b>
8.1 隔离降压变换器	584
8.2 复位方案 1: 第 3 绕组	588
8.3 复位方案 2: 双开关结构	596
8.4 复位方案 3: 谐振退磁	602
8.5 复位方案 4: RCD 钳位	607
8.6 复位方案 5: 有源钳位	616



8.7 同步整流	629
8.8 多输出正激式变换器	632
8.9 正激变换器的小信号响应	646
8.10 单输出 12 V/250 W 正激式变换器设计	656
8.11 正激变换器的元件约束	672
8.12 小结	673
参考文献	673
附录 8A 应用自举技术的半桥驱动器	675
附录 8B 阻抗折算	677
附录 8C 250 W 适配器的变压器和电感设计	680
附录 8D 附赠光盘内容	688
结语	689