



Education

电源系列丛书

Switching Power Supply
Design (Third Edition)

开关电源设计 (第三版)

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

〔美〕 Abraham I. Pressman
Keith Billings
Taylor Morey

著

王志强 肖文勋 虞 龙 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电源系列丛书

开关电源设计

(第三版)

[美] Abraham I. Pressman
Keith Billings
Taylor Morey 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为二十几年来世界公认最权威的电源设计指导著作《开关电源设计》的再版(第三版)。

书中系统地论述了开关电源最常用拓扑的基本原理、磁性元件的设计原则及闭环反馈稳定性和驱动保护等。本书在讲述的过程中应用教学式、How & Why 方法,讨论时结合了大量设计实例、设计方程和图表。本书同时涵盖了开关电源技术、材料和器件的最新发展等内容。

本书的主要特色内容包括:各种最常用开关电源拓扑设计、解决日常设计难题所需的基础知识、变压器及磁设计原理的深入分析,以及在第二版基础上补充的电抗器设计和现代高速 IGBT 的最佳驱动条件等。

本书可作为学习、研究高频开关电源的高校师生的教材,并可作为从事开关电源设计、开发的工程师的设计参考资料。

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。

Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey

Switching Power Supply Design, Third Edition

ISBN: 978-0-07-148272-1

Copyright © 2009 by The McGraw-Hill Companies Inc.

All Rights Reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版专有出版权由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

本书封底贴有 McGraw-Hill 公司的激光防伪标贴,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2007-4583

图书在版编目(CIP)数据

开关电源设计/(美)普里斯曼,比利斯,莫瑞著;王志强等译.—3版.—北京:电子工业出版社,2010.6
(电源系列丛书)

ISBN 978-7-121-11081-8

I. ①开… II. ①普… ②比… ③莫… ④王… III. ①开关电源-设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 108443 号

责任编辑:柴 燕

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:33.75 字数:864 千字

印 次:2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:98.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

作者简介

Abraham I. Pressman 是美国知名的电源顾问和专家,曾经做过军事雷达军官和四十多年的模数设计工程师。在过去的半个多世纪里,他为电子领域里的数个“第一”作出了重要贡献:第一个用粒子加速器获得 10 亿伏特电压的能量、第一台用于计算机工业的快速打印机、第一个在宇宙飞船上拍摄月球表面照片的技术,最早介绍用晶体管设计计算机逻辑电路的教科书,以及开关电源的教科书。

Pressman 先生是《开关电源设计》前两版的作者。

Keith Billings 是一名注册电子工程师,电源领域的专家,《Switchmode Power Supply Handbook》(由 McGraw-Hill 出版)的作者。他早期当过机械仪器制造商,为皇家空军的自动驾驶和电子指南设备等导航仪器做过技术支持;在政府的军事部门工作过,并专门从事包括 UK3 卫星的军用特殊仪器的设计。在过去的 44 年时间里,他专门从事开关电源设计和制造业。75 岁时,仍然活跃于电源工业界,并在加拿大圭尔夫市成立了自己的咨询公司——DKB 电源有限公司。在此书中,Keith 献出了 Abe Pressman 关于电源设计的培训课程,以及自己关于磁学的培训课程——变压器和电感的设计。

Keith 曾是一名狂热的帆船爱好者,但现在的爱好是玩滑翔机,在 1993 年时已建造了一艘高性能的滑翔机,1994 年时曾在内华达明登滑翔至 22,000 英尺的海拔高度。

Taylor Morey 是加拿大安大略省基臣纳尔市的康耐斯托加学院电子学科的教授,与人合著过电子器件教科书,曾在滑铁卢市的威尔福德劳瑞尔大学任教,在拉巴斯天主教大学教电子工程专业课。他作为自由电源工程师和顾问,以及在乔治敦的加拿大 Varian 的开关电源开发部、圭尔夫市的 Hammond 制造业和 GFC 电源工作时,多次与 Keith Billings 合作。在其职业生涯早期,曾在加拿大 IBM 大型计算机研究部和多伦多全球电视工作室工作。

致 谢

首先特别要感谢我的工程同事和多年老友 Taylor Morey 先生,他花费了比我多得多的时间认真检查了初稿的文字、语法、图表、方程及公式。

我知道他对文稿做了成千上万次的调整,如果书中还留有任何错误的话,那责任完全在我。

我还要感谢 Anne Pressman 女士,感谢她允许我参与 Pressman 先生新版书的编辑。感谢 Wendy Rinaldi 和 Lee Ann Pickrell 以及 Mc Graw Hill 出版社的同事对本书出版所做的非常专业的工作。

许多人为本书作出了贡献,当然要感谢参考文献中所列出的著作和论文的作者们,同样也要感谢那些为本书作出贡献而未被提名的同行专家。

“我们能够看得远,是因为我们站在巨人的肩膀上”。

前 言

那些在作者去世之后,仍被读者持续保持高需求的技术书籍并不多见。Abraham Pressman 著述的关于开关电源设计的书,自 1977 年第一次出版,直到作者以 86 岁高龄逝世之后的许多年里,仍然十分畅销,这种现象恰好是对作者出色工作的最好肯定。他留给了我们一件珍贵的遗产,并很好地经过了时间的检验。

Abraham 活跃于电子工业领域的时间将近 60 年。在 83 岁之前 15 年里,他一直讲授关于开关电源设计的培训课程。在他晚年的时候,我有幸结识他,并且和他在许多项目上有合作。Abraham 告诉他的学生我的书(指《开关电源手册》,译者注)是关于开关电源设计的第二本最好的书籍(不一定客观,但确实是来自老专家的难得的和宝贵的赞誉)。

在我开始设计开关电源的 19 世纪 60 年代,关于这方面的信息非常少。那时开关电源是一项新技术,并且数量有限的专攻此领域的公司和工程师们也很少告诉圈外人他们的工作内容。当我看到 Abraham 的书时,开关电源设计的神秘面纱才被揭开,他的书像一束阳光照亮了这项新技术。学习了 Abraham 的著作,我的设计能力提高得很快。

2000 年,当 Abraham 觉得他已不再能够继续他的开关电源设计培训课程时,他希望我去接手课程教案,继续培训课程,我为此深感自豪。但我发现课程的信息量极大,我不可能在 4 天内介绍这么多的内容,尽管很多年来他一直都是这样做的。另外,我感到他的笔记和投影片由于多年使用造成侵蚀,已不太清楚。

我简化了教案并把它转换成 PowerPoint,存在我的笔记本电脑里,并且于 2001 年 11 月在波士顿,我第一次介绍了我改写的为期 3 天的培训课程。虽然只到了两个学生(大多数公司已经削减了他们的培训预算),但这个可怜的到场率已远远被 Abraham 和他的妻子安妮的到场而弥补。Abraham 那时已很虚弱,我真的很高兴他活着看到他的遗产继续发挥作用,尽管是以一个很不同的形式展现。我认为他对动态多媒体演示有一点困惑,因为我能通过我的笔记本电脑悠闲地控制它。我不知道他对我这样演示有何想法,但安妮挥舞着手说:“若是 Abraham 的话,他会站在黑板前用教鞭来讲解课程!”

当 McGraw-Hill 公司邀请我合著 Abraham 的第三版书时,我欣然应诺,因为我相信如果他现在在世也会希望我这样做。在本书第二版出版后的 8 年里,技术有了很大发展,基本元器件性能有了很大改善,这已改变了许多 Abraham 的书中所提到的限制,所以这是一个进行调整并添加一些新内容的好时机。

当我审核本书第二版时,脑海里浮现出一位英国园丁做评论的情景:这位园丁站在百年未变的乡村小屋外面,面对一个新来的城市少壮派,作为对这个年轻人想来此推行现代化的做法的回应,他说:“小伙子,看看你周围,并没有什么错误,是不是?”这个评论也很适用于 Abraham 的第二版书。

因此,除现有技术超越 Abraham 的工作的方面之外,我决定不修改 Abraham 久经考验的专著。他把各种拓扑电路当作独立个体分析的务实的做法,可能与当今专家教学方式不尽一致,但对于想理解各种各样可能的拓扑的入门工程师,以及那些富有经验的工程师,这是一个行之有效的办法。对现代专家非常有价值的状态空间平均模型、规范模型、双边反演技术或对偶原

理却不适合 Abraham。他的书为读者提供了电源原理的基础,说明了该怎么做以及为什么这么做。以后我们有足够的时间,从一些现有的优秀专业书籍了解更多的现代概念(见参考书目)。

Abraham 的原稿是手写的,并且经他的妻子安妮辛勤工作几年打成印刷体。为了出版第三版,McGraw – Hill 将印刷体原稿转换为更易编辑的数字文档。这使 Taylor Morey 和我能方便地对文稿做少量的格式调整,及对一些方程、计算、图表进行更正(一些错漏仅由推导过程造成)。对一些些许变化就可以使文字更加流畅、读者更易理解的地方也做了修订。但读者很容易发现,这些变化不会改变 Abraham 先生的本意。

在一些器件的新技术发展使第二版中提到的某些限制表达欠妥处,我以“After Pressman”(译文中译为“补充”,译者注)写了补充解释;在一些觉得需要补充说明的地方我以“TIP”(译文中译为“提示”,译者注)和“NOTE”(译文中译为“注释”,译者注)引出。

我也给第 7 章和第 9 章增加了一些新内容,因为我觉得一些新的设计方法对读者非常有用,并且 IGBT 技术的发展已使它成为 Abraham 先前所讨论的受限器件的很好的补充。这样,本书并未改变第二版书的原有结构。另外,由于索引和参考文献照样适用,读者会发现想查找的内容仍在原来的位置。当然,页码确实改变了,这无法避免。

即使您已有 Pressman 所著的本书的第二版,我也确信,由于有了以上所述的修订和补充,您会觉得第三版也非常值得购买。另外,您也会发现我所著的《开关电源手册》第二版(McGraw – Hill, 1999)是本书非常好的姊妹著作,它提供给作者与本书稍有不同的电源设计方法。

Keith Billings

译者序

随着电力电子技术的迅速发展,高频开关电源已广泛应用于计算机、通信、工业加工和航空航天等领域。因此,从事开关电源学习和研究的高校师生及从事开关电源设计研发的工程人员,都迫切需要理论性、实用性强的学习资料。这便是我们向同行介绍本书的用意所在。

本书是世界公认的最权威的电源设计指导著作“开关电源设计”的再版。它介绍了开关电源设计最常用拓扑的基本原理以及设计尖端开关电源所需的基本资料,涵盖了开关电源领域技术、材料和器件的最新进展等内容。本书表达严谨规范,材料全面系统,是开关电源领域拓扑理论分析与实际电路设计结合得非常好的一本书。

这里要说明,本书是英文原版的中译本,电路中的符号均采用原版形式。

本书的翻译历时半年,翻译工作由华南理工大学电力学院王志强副教授、电力学院肖文勋博士和英特矽尔半导体中国应用中心虞龙高级工程师共同组织完成。翻译工作得到了广东省电源学会理事长张波教授的大力支持。华南理工大学电力电子与电力传动专业毕业研究生刘少纯、李华、陈伟、段守圣、农苏美、刘芽芽、邱爽、严伟加、邱添泉、任凌、谢兴菊等同学承担了本书大部分章节的翻译工作,没有他们的积极参与和认真工作,本书的翻译出版几乎是不可能的。出于对原著的尊重,本书中部分单位未做国标化处理,请读者阅读时注意。

还要感谢本书作者 Abraham I. Pressman 先生,Keith Billings 先生和 Taylor Morey 先生,感谢 Mc Graw-Hill 公司,感谢电子工业出版社编辑柴燕女士对本书翻译工作的支持和她的辛勤工作。

鉴于译者的水平有限,时间仓促,译文的不足和错漏之处在所难免,希望读者予以批评指正。

译者

目 录

第 1 部分 拓 扑

第 1 章 基本拓扑	2
1.1 引言——线性调整器和 Buck、Boost 及反相开关型调整器	2
1.2 线性调整器——耗能型调整器	2
1.2.1 基本工作原理	2
1.2.2 线性调整器的缺点	3
1.2.3 串接晶体管的功率损耗	4
1.2.4 线性调整器的效率与输出电压的关系	4
1.2.5 串接 PNP 型晶体管的低功耗线性调整器	5
1.3 开关型调整器拓扑	6
1.3.1 Buck 开关型调整器	6
1.3.2 Buck 调整器的主要电流波形	8
1.3.3 Buck 调整器的效率	9
1.3.4 Buck 调整器的效率(考虑交流开关损耗)	10
1.3.5 理想开关频率的选择	12
1.3.6 设计例子	12
1.3.7 输出电容	17
1.3.8 有直流隔离调整输出的 Buck 调整器的电压调节	18
1.4 Boost 开关调整器拓扑	19
1.4.1 基本原理	19
1.4.2 Boost 调整器的不连续工作模式	20
1.4.3 Boost 调整器的连续工作模式	21
1.4.4 不连续工作模式的 Boost 调整器的设计	22
1.4.5 Boost 调整器与反激变换器的关系	24
1.5 反极性 Boost 调整器	24
1.5.1 基本工作原理	24
1.5.2 反极性调整器设计关系	26
参考文献	26
第 2 章 推挽和正激变换器拓扑	27
2.1 引言	27
2.2 推挽拓扑	27
2.2.1 基本原理(主/辅输出结构)	27
2.2.2 辅输出的输入—负载调整率	29
2.2.3 辅输出电压偏差	29

2.2.4	主输出电感的最小电流限制	30
2.2.5	推挽拓扑中的磁通不平衡(偏磁饱和现象)	30
2.2.6	磁通不平衡的表现	32
2.2.7	磁通不平衡的测试	34
2.2.8	磁通不平衡的解决方法	34
2.2.9	功率变压器设计	36
2.2.10	初/次级绕组的峰值电流及有效值电流	38
2.2.11	开关管的电压应力及漏感尖峰	41
2.2.12	功率开关管损耗	42
2.2.13	推挽拓扑输出功率及输入电压的限制	44
2.2.14	输出滤波器的设计	45
2.3	正激变换器拓扑	46
2.3.1	基本工作原理	46
2.3.2	输出/输入电压与导通时间和匝数比的设计关系	49
2.3.3	辅输出电压	49
2.3.4	次级负载、续流二极管及电感的电流	50
2.3.5	初级电流、输出功率及输入电压之间的关系	50
2.3.6	功率开关管最大关断电压应力	51
2.3.7	实际输入电压和输出功率限制	51
2.3.8	功率和复位绕组匝数不相等的正激变换器	52
2.3.9	正激变换器电磁理论	53
2.3.10	功率变压器的设计	55
2.3.11	输出滤波器的设计	57
2.4	双端正激变换器拓扑	58
2.4.1	基本原理	58
2.4.2	设计原则及变压器的设计	60
2.5	交错正激变换器拓扑	60
2.5.1	基本工作原理、优缺点和输出功率限制	60
2.5.2	变压器的设计	62
2.5.3	输出滤波器的设计	62
	参考文献	62
第3章	半桥和全桥变换器拓扑	63
3.1	引言	63
3.2	半桥变换器拓扑	63
3.2.1	工作原理	63
3.2.2	半桥变换器磁设计	64
3.2.3	输出滤波器的设计	65
3.2.4	防止磁通不平衡的隔直电容的选择	66
3.2.5	半桥变换器的漏感问题	66
3.2.6	半桥变换器与双端正激变换器的比较	67

3.2.7 半桥变换器实际输出功率的限制	68
3.3 全桥变换器拓扑	68
3.3.1 基本工作原理	68
3.3.2 全桥变换器磁设计	69
3.3.3 输出滤波器的计算	70
3.3.4 变压器初级隔直电容的选择	71
第4章 反激变换器	72
4.1 引言	74
4.2 反激变换器基本工作原理	74
4.3 反激变换器工作模式	74
4.4 断续工作模式	75
4.4.1 输入电压、输出电压及导通时间与输出负载的关系	76
4.4.2 断续模式向连续模式的过渡	76
4.4.3 反激变换器连续模式的基本工作原理	78
4.5 设计原则和设计步骤	79
4.5.1 步骤1:确定初/次级匝数比	79
4.5.2 步骤2:保证磁心不饱和且电路始终工作于 DCM 模式	79
4.5.3 步骤3:根据最小输出电阻及直流输入电压调整初级电感	80
4.5.4 步骤4:计算开关管的最大电压应力和峰值电流	80
4.5.5 步骤5:计算初级电流有效值和导线尺寸	80
4.5.6 步骤6:次级电流有效值和导线尺寸	81
4.6 断续模式下的反激变换器的设计实例	81
4.6.1 反激拓扑的电磁原理	83
4.6.2 铁氧体磁心加气隙防止饱和	84
4.6.3 采用 MPP 磁心防止饱和	84
4.6.4 反激变换器的缺点	89
4.7 120V/220V 交流输入反激变换器	90
4.8 连续模式反激变换器的设计原则	92
4.8.1 输出电压和导通时间的关系	92
4.8.2 输入、输出电流与功率的关系	93
4.8.3 最小直流输入时连续模式下的电流斜坡幅值	93
4.8.4 断续与连续模式反激变换器的设计实例	94
4.9 交错反激变换器	95
4.9.1 交错反激变换器次级电流的叠加	96
4.10 双端(两开关管)断续模式反激变换器	97
4.10.1 应用场合	97
4.10.2 基本工作原理	97
4.10.3 双端反激变换器的漏感效应	98
参考文献	99
第5章 电流模式和电流馈电拓扑	100

5.1 简介	100
5.1.1 电流模式控制	100
5.1.2 电流馈电拓扑	100
5.2 电流模式控制	100
5.2.1 电流模式控制的优点	101
5.3 电流模式和电压模式控制电路的比较	102
5.3.1 电压模式控制电路	102
5.3.2 电流模式控制电路	105
5.4 电流模式优点详解	107
5.4.1 输入网压的调整	107
5.4.2 防止偏磁	107
5.4.3 在小信号分析中可省去输出电感简化反馈环设计	107
5.4.4 负载电流调整原理	109
5.5 电流模式的缺点和存在的问题	109
5.5.1 恒定峰值电流与平均输出电流的比例问题	109
5.5.2 对输出电感电流扰动的响应	111
5.5.3 电流模式的斜率补偿	111
5.5.4 用正斜率电压的斜率补偿	112
5.5.5 斜率补偿的实现	113
5.6 电压馈电和电流馈电拓扑的特性比较	114
5.6.1 引言及定义	114
5.6.2 电压馈电 PWM 全桥变换器的缺点	114
5.6.3 Buck 电压馈电全桥拓扑基本工作原理	117
5.6.4 Buck 电压馈电全桥拓扑的优点	118
5.6.5 Buck 电压馈电 PWM 全桥电路的缺点	119
5.6.6 Buck 电流馈电全桥拓扑——基本工作原理	120
5.6.7 反激电流馈电推挽拓扑(Weinberg 电路)	129
参考文献	142
第6章 其他拓扑	143
6.1 SCR 谐振拓扑概述	143
6.2 SCR 和 ASCR 的基本工作原理	144
6.3 利用谐振正弦阳极电流关断 SCR 的单端谐振逆变器拓扑	148
6.4 SCR 谐振桥式拓扑概述	150
6.4.1 串联负载 SCR 半桥谐振变换器的基本工作原理	152
6.4.2 串联负载 SCR 半桥谐振变换器的设计计算	153
6.4.3 串联负载 SCR 半桥谐振变换器的设计实例	155
6.4.4 并联负载 SCR 半桥谐振变换器	155
6.4.5 单端 SCR 谐振变换器拓扑的设计	156
6.5 Cuk 变换器拓扑概述	160
6.5.1 Cuk 变换器的基本工作原理	160

6.5.2	输出/输入电压比与开关管 Q1 导通时间的关系	161
6.5.3	L1 和 L2 的电流变化率	162
6.5.4	消除输入电流纹波的措施	163
6.5.5	Cuk 变换器的隔离输出	163
6.6	小功率辅助电源拓扑概述	164
6.6.1	辅助电源的接地问题	164
6.6.2	可供选择的辅助电源	165
6.6.3	辅助电源的典型电路	165
6.6.4	Royer 振荡器辅助电源的基本工作原理	167
6.6.5	作为辅助电源的简单反激变换器	176
6.6.6	作为辅助电源的 Buck 调节器(输出带直流隔离)	179
	参考文献	179

第 2 部分 磁路与电路设计

第 7 章	变压器及磁性元件设计	181
7.1	引言	181
7.2	变压器磁心材料与几何结构、峰值磁通密度的选择	182
7.2.1	几种常用铁氧体材料的磁心损耗与频率和磁通密度的关系	182
7.2.2	铁氧体磁心的几何尺寸	183
7.2.3	峰值磁通密度的选择	187
7.3	磁心最大输出功率、峰值磁通密度、磁心和骨架面积及线圈电流密度的选择	187
7.3.1	变换器拓扑输出功率公式的推导	187
7.3.2	推挽变换器输出功率公式的推导	190
7.3.3	半桥拓扑输出功率公式的推导	193
7.3.4	全桥拓扑输出功率公式的推导	194
7.3.5	以查表的方式确定磁心和工作频率	194
7.4	变压器温升的计算	201
7.5	变压器中的铜损	204
7.5.1	引言	204
7.5.2	集肤效应	204
7.5.3	集肤效应——定量分析	205
7.5.4	不同规格的线径在不同频率下的交/直流阻抗比	206
7.5.5	矩形波电流的集肤效应 ^[14]	208
7.5.6	邻近效应	208
7.6	引言:利用面积乘积(AP)法进行电感及磁性元件设计	215
7.6.1	AP 法的优点	216
7.6.2	电感器设计	217
7.6.3	信号级小功率电感	217
7.6.4	输入滤波电感	217
7.6.5	设计举例:60Hz 共模输入滤波电感	219

7.6.6 差模输入滤波电感	224
7.7 磁学:扼流线圈简介——直流偏置电流很大的电感	227
7.7.1 公式、单位和图表	228
7.7.2 有磁化直流偏置的磁化曲线特征	229
7.7.3 磁场强度 H_{dc}	230
7.7.4 增加扼流圈电感或者额定直流偏置量的方法	230
7.7.5 磁通密度 ΔB	231
7.7.6 气隙的作用	233
7.7.7 温升	233
7.8 磁设计——扼流圈磁心材料简介	234
7.8.1 适用于低交流应力场合的扼流圈材料	234
7.8.2 适用于高交流应力场合的扼流圈材料	234
7.8.3 适用于中等范围的扼流圈材料	234
7.8.4 磁心材料饱和特性	234
7.8.5 磁心材料损耗特性	235
7.8.6 材料饱和特性	236
7.8.7 材料磁导率参数	237
7.8.8 材料成本	237
7.8.9 确定最佳的磁心尺寸和形状	238
7.8.10 磁心材料选择总结	238
7.9 磁学:扼流圈设计例子	238
7.9.1 扼流圈设计例子:加了气隙的铁氧体磁心	238
7.9.2 步骤一:确定 20% 纹波电流需要的电感量	240
7.9.3 步骤二:确定面积乘积 (AP)	240
7.9.4 步骤三:计算最小匝数	240
7.9.5 步骤四:计算磁心气隙	241
7.9.6 步骤五:确定最佳线径	242
7.9.7 步骤六:计算最佳线径	242
7.9.8 步骤七:计算绕组电阻	243
7.9.9 步骤八:确定功率损耗	243
7.9.10 步骤九:预测温升——面积乘法	243
7.9.11 步骤十:核查磁心损耗	244
7.10 磁学:用粉芯磁心材料设计扼流圈——简介	246
7.10.1 影响铁粉芯磁心材料选择的因素	247
7.10.2 粉芯材料的饱和特性	247
7.10.3 粉芯材料的损耗特性	248
7.10.4 铜耗——低交流应力时限制扼流圈设计的因素	249
7.10.5 磁心损耗——高交流应力时限制扼流圈设计的因素	249
7.10.6 中等交流应力时的扼流圈设计	250
7.10.7 磁心材料饱和特性	250

7.10.8	磁心的几何结构	250
7.10.9	材料成本	250
7.11	扼流圈设计例子:用环形 Kool M μ 材料设计受铜耗限制的扼流圈	251
7.11.1	引言	251
7.11.2	根据所储存能量和面积乘法选择磁心尺寸	251
7.11.3	受铜耗限制的扼流圈设计例子	252
7.12	用各种 E 形粉芯设计扼流圈的例子	256
7.12.1	引言	256
7.12.2	第一个例子:用#40E 形铁粉芯材料设计扼流圈	257
7.12.3	第二个例子:用#8E 形铁粉芯磁心设计扼流圈	262
7.12.4	第三个例子:用#60 E 形 Kool M μ 磁心设计扼流圈	263
7.13	变感扼流圈设计例子:用 E 形 Kool M μ 磁芯设计受铜耗限制的扼流圈	266
7.13.1	变感扼流圈	266
7.13.2	变感扼流圈设计例子	266
	参考文献	269
第 8 章	双极型大功率晶体管的基极驱动电路	270
8.1	引言	270
8.2	双极型晶体管的理想基极驱动电路的主要目标	270
8.2.1	导通期间足够大的电流	270
8.2.2	导通瞬间基极过驱动峰值输入电流 I_{b1}	271
8.2.3	关断瞬间反向基极电流尖峰 I_{b2}	272
8.2.4	关断瞬间基射极间的 $-1 \sim -5V$ 反向电压尖峰	274
8.2.5	贝克 (Baker) 钳位电路(能同时满足高、低 β 值的晶体管工作要求的电路)	274
8.2.6	对驱动效率的改善	275
8.3	变压器耦合的贝克 (Baker) 钳位电路	275
8.3.1	Baker 钳位的工作原理	277
8.3.2	使用变压器耦合的 Baker 钳位电路	278
8.3.3	结合集成变压器的 Baker 钳位	282
8.3.4	达林顿管 (Darlington) 内部的 Baker 钳位电路	283
8.3.5	比例基极驱动	284
8.3.6	其他类型的基极驱动电路	288
	参考文献	292
第 9 章	MOSFET 和 IGBT 及其驱动电路	293
9.1	MOSFET 概述	293
9.1.1	IGBT 概述	293
9.1.2	电源工业的变化	293
9.1.3	对新电路设计的影响	293
9.2	MOSFET 管的基本工作原理	294
9.2.1	MOSFET 管的输出特性 ($I_d - V_{ds}$)	294
9.2.2	MOSFET 管的通态阻抗 $r_{ds(on)}$	297

9.2.3	MOSFET 管的输入阻抗米勒效应和栅极电流	297
9.2.4	计算栅极电压的上升和下降时间已获得理想的漏极电流上升和下降时间	299
9.2.5	MOSFET 管栅极驱动电路	300
9.2.6	MOSFET 管 r_{ds} 温度特性和安全工作区	302
9.2.7	MOSFET 管栅极阈值电压及其温度特性	304
9.2.8	MOSFET 管开关速度及其温度特性	305
9.2.9	MOSFET 管的额定电流	305
9.2.10	MOSFET 管并联工作	307
9.2.11	推挽拓扑中的 MOSFET 管	309
9.2.12	MOSFET 管的最大栅极电压	310
9.2.13	MOSFET 管源漏极间的体二极管	310
9.3	绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 概述	311
9.3.1	选择合适的 IGBT	311
9.3.2	IGBT 构造概述	312
9.3.3	IGBT 工作特性	313
9.3.4	IGBT 并联使用	315
9.3.5	技术参数和最大额定值	315
9.3.6	静态电学特性	317
9.3.7	动态特性	318
9.3.8	温度和机械特性	320
	参考文献	322
第 10 章	磁放大器后级调节器	323
10.1	引言	323
10.2	线性调整器和 Buck 后级调整器	324
10.3	磁放大器概述	324
10.3.1	用作快速开关的方形磁滞回线磁心	326
10.3.2	磁放大器中的关断和导通时间	328
10.3.3	磁放大器磁心复位及稳压	328
10.3.4	利用磁放大器关断辅输出	329
10.3.5	方形磁滞回线磁心特性和几种常用磁心	330
10.3.6	磁心损耗和温升的计算	337
10.3.7	设计实例——磁放大器后级整流	338
10.3.8	磁放大器的增益	341
10.3.9	推挽电路的磁放大器输出	341
10.4	磁放大器脉宽调制器和误差放大器	342
10.4.1	磁放大器脉宽调制及误差放大器电路	342
	参考文献	344
第 11 章	开关损耗分析与负载线整形缓冲电路设计	346
11.1	引言	346
11.2	无缓冲电路的晶体管的关断损耗	347

11.3 RCD 关断缓冲电路	348
11.4 RCD 缓冲电路中电容的选择	349
11.5 设计范例——RCD 缓冲电路	349
11.5.1 接电源正极的 RCD 缓冲电路	350
11.6 无损缓冲电路	351
11.7 负载线整形(减少尖峰电压以防止晶体管二次击穿的缓冲器)	352
11.8 变压器无损缓冲电路	353
参考文献	354
第 12 章 反馈环路的稳定	355
12.1 引言	355
12.2 系统振荡原理	356
12.2.1 电路稳定的增益准则	356
12.2.2 电路稳定的增益斜率准则	356
12.2.3 输出 LC 滤波器的增益特性(输出电容含/不含 ESR)	360
12.2.4 脉宽调制器的增益	361
12.2.5 LC 输出滤波器加调制器和采样网络的总增益	362
12.3 误差放大器幅频特性曲线的设计	362
12.4 误差放大器的传递函数、极点和零点	364
12.5 零点、极点频率引起的增益斜率变化规则	365
12.6 只含单零点和单极点的误差放大器传递函数的推导	366
12.7 根据 2 型误差放大器的零点、极点位置计算相移	367
12.8 考虑 ESR 时 LC 滤波器的相移	368
12.9 设计实例——含有 2 型误差放大器的正激变换器反馈环路的稳定性	368
12.10 3 型误差放大器的应用及其传递函数	371
12.11 3 型误差放大器零点、极点位置引起的相位滞后	372
12.12 3 型误差放大器的原理图、传递函数及零点、极点位置	373
12.13 设计实例——通过 3 型误差放大器反馈环路稳定正激变换器	374
12.14 3 型误差放大器元件的选择	376
12.15 反馈系统的条件稳定	376
12.16 不连续模式下反激变换器的稳定	377
12.16.1 从误差放大器端到输出电压节点的直流增益	377
12.16.2 不连续模式下反激变换器的误差放大器输出端到输出电压节点的传递函数	379
12.17 不连续模式下反激变换器误差放大器的传递函数	380
12.18 设计实例——不连续模式下反激变换器的稳定	381
12.19 跨导误差放大器	382
参考文献	384
第 13 章 谐振变换器	385
13.1 引言	385
13.2 谐振变换器	385
13.3 谐振正激变换器	386