

电 源 系 列

现代高频开关电源 技术及应用



TN86/63

2008

电源系列

现代高频开关电源技术及应用

刘凤君 编著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了现代高频开关电源的组成、工作原理和设计制作。其中,包括 14 种 PWM DC/DC 高频开关转换器的基本电路形式、工作原理、控制技术和设计方法。介绍了高频转换器的吸收电路与软开关技术,高频开关转换器中的磁性元件及其设计与制作工艺,输出同步整流技术、有源功率因数校正技术、高频开关转换器的并联均流技术、热插拔技术;智能功率开关与低输入电压 VRM,瞬态建模与分析,频域分析与综合;EMC 设计、可靠性设计、热设计、优化设计与仿真,以及设计方法的应用举例等。为使读者对高频开关电源技术有一个全面的了解,还对高频开关电源的诞生与发展历程进行了简单的介绍。本书的特点是:反映了现代高频开关电源技术的最新水平,内容全面、实用。本书可以作为国内高校有关专业的本科生或研究生的教材或参考书用,也可以供有关专业的科研人员与设计生产的工程技术人员阅读参考。

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。

图书在版编目(CIP)数据

现代高频开关电源技术及应用/刘凤君编著. —北京:电子工业出版社, 2008.1
(电源系列)

ISBN 978-7-121-05507-2

I. 现… II. 刘… III. 高频—开关电源 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 185342 号

责任编辑:张 榕(ZR@phei.com.cn) 特约编辑:李云霞

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

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:49.25 字数:1260 千字

印 次:2008 年 1 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:88.00 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 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。

前 言

所谓高频开关电源,广义地说,凡是利用功率半导体器件作为开关,将一种电源形态转变成另一种电源形态的主电路都叫做开关转换器电路,利用高频脉宽调制(PWM)技术或高频脉冲频率调制(PFM)技术,在转变时通过对开关转换器的自动闭环控制来稳定输出电压,并具有保护与显示环节的,则称为高频开关电源。

自从20世纪70年代,用高频开关电源取代线性调节器式电源以来,高频开关电源得到了很大的发展。40多年来,高频开关电源的技术进步和发展历程有三大标志:①功率半导体开关器件用功率场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)取代了70年代使用的普通功率晶体管;②高频化PWM与PFM控制技术的应用和软开关技术的应用;③开关电源系统集成技术的应用。现代的高频开关电源技术是发展最快、应用最广泛的一种电力电子电源技术。可以说,凡是用电的电子设备没有不用开关电源的,如家用电器中的电视机、个人计算机、音响设备、日光灯镇流器、医院的医疗设备、通信电源、航空航天电源、UPS电源、变频器电源、交流电动机的变频调速电源、便携式电子设备的电源等,都要使用高频开关电源。它的应用面之广,应用数量之大是任何电力电子电源都无法比拟的。由于高频开关电源的应用面最广,应用的数量多,因而从事高频开关电源研发的工程科技人员也是最多的。由于读者面广,所以有关高频开关电源的科技图书也出版得较多。但根据读者的反映,能够全面系统地介绍现代高频开关电源技术与设计应用的书却不多,特别是能反映近几年高频开关电源最新技术的书更少。电子工业出版社根据读者要求,准备出版一本能够全面系统地反映现代高频开关电源最新技术成就,而且又便于实际设计应用的,并把这个任务委托给我来完成。我查阅了2000年以来在《电源技术应用》、《电源世界》、中国电源学会全国电源技术年会论文集,以及各出版社出版的有关开关电源的书,取其精华编辑成此书。其中,反映了对高频开关电源理论作出贡献的蔡宣三教授、张占松教授、黄济青教授、阮新波教授等人的成就,在此说明并深表感谢!

本书特点:①全面系统地介绍了现代高频开关电源的最新技术成就,如软开关技术、同步整流技术、有源功率因数校正技术、并联系统的均流技术与热插拔技术、瞬态建模分析、频域分析与综合、最优设计与仿真等;②实用性强,根据本书的内容,可以对各种不同要求、不同类型的高频开关电源进行研发设计。书中介绍了各种不同类型高频开关电源的设计方法与制作工艺,其中包括可行设计、仿真设计和最优设计。特别是对高频开关变压器与电感器的设计及绕制,书中分别介绍了两种设计方法及实际设计计算实例,以及平面变压器的设计等。

本书共有16章。

第1章是引论,在此章中介绍了高频开关电源的诞生、结构和定义,高频化的进程与发展趋势。



第2章介绍了PWM DC/DC转换器,其中包括PWM DC/DC转换器的基本电路类型及其等效电路,各基本电路之间的对偶关系、演化与级联。

第3章介绍了PWM DC/DC转换器的原理及基本电量关系,连续工作模式与断续工作模式,正激与反激、半桥与全桥、隔离式与非隔离式等。

第4章介绍了高频开关转换器的吸收电路与软开关技术,如ZVS与ZCS等。

第5章介绍了有源钳位技术与移相控制ZVS PWM转换器。

第6章介绍了高频开关转换器中的磁性元件,其中包括变压器与电感器的原理、功能与设计及绕制方法。

第7章介绍了高频开关转换器的输出同步整流技术。

第8章介绍了有源功率因数校正技术。

第9章介绍了高频开关转换器的控制电路与驱动电路。

第10章介绍了开关电源设计中的两项新技术、智能开关与低输入电压或高输入电压的VRM。

第11章介绍了高频开关电源并联的均流技术与热插拔控制芯片ISL6140。

第12章介绍了开关电源的瞬态建模与分析。

第13章介绍了开关电源的频域分析与综合。

第14章介绍了开关电源的EMC设计、可靠性设计、热设计和最优设计与仿真的方法。

第15章介绍了开关电源的可行设计、最优设计和仿真设计的实际应用举例、与开关电源的封装设计。

第16章介绍了电子镇流器、便携式电子设备的低压输入转换器的原理与设计。

从以上的内容介绍可知,现代高频开关电源技术所涉及的内容是十分复杂与广泛的,它横跨了三个学科:即微电子学的智能化专用集成电路芯片、快速高性能的功率半导体开关器件和磁性器件如变压器、电感器所用磁心材料及绕制工艺等。开关电源已经广泛地应用在国民经济和人类生活的各个领域,对开关电源使用的要求越来越严格。因而促使开关电源技术的发展速度越来越快,使书的出版总是落后于技术的发展。此外不少的文献资料由于某些原因可能会被遗漏而没有反映在到书中,已被吸入到书中的内容也可能会有不足和错误之处,敬请广大的读者批评指正,作者在此表示衷心的感谢!

作者
于北京航天二院

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 线性调节器式直流稳压电源与开关调节器式直流稳压电源	1
1.1.1 线性调节器式直流稳压电源	1
1.1.2 开关调节器式直流稳压电源	5
1.2 高频开关电源的诞生、结构和定义	10
1.2.1 高频开关电源的诞生过程	11
1.2.2 现代高频开关电源的定义和结构形式	11
1.3 开关电源的分类	13
1.4 对开关电源的要求与发展方向	14
1.5 高频化进程、推动发展的技术与研发趋势	16
1.5.1 开关电源高频化的历史进程	16
1.5.2 20 世纪推动开关电源发展的主要技术	17
1.5.3 开关电源技术的研发趋势	25
参考文献	32
第 2 章 PWM DC/DC 转换器	33
2.1 概述	33
2.1.1 PWM DC/DC 转换器的定义与工作模式	33
2.1.2 PWM DC/DC 转换器的工作原理	34
2.2 PWM DC/DC 转换器电路与对偶	36
2.2.1 PWM DC/DC 转换器的基本电路	36
2.2.2 PWM DC/DC 转换器的等效电路	38
2.2.3 PWM DC/DC 转换器的对偶	39
2.2.4 功率开关器件的对偶	41
2.3 隔离式 PWM DC/DC 转换器	43
2.3.1 单端隔离式 PWM DC/DC 转换器	43
2.3.2 正激式 PWM DC/DC 转换器	44
2.3.3 双管正激式 PWM DC/DC 转换器	45
2.3.4 反激式 PWM DC/DC 转换器	46
2.3.5 双端隔离式 PWM DC/DC 转换器	46
2.3.6 PWM DC/DC 推挽转换器	47
2.3.7 PWM DC/DC 半桥转换器和全桥转换器	47
2.3.8 隔离式 PWM DC/DC 转换器的比较	49



2.4	基本 PWM DC/DC 转换器的演化与级联	49
2.4.1	基本 PWM DC/DC 转换器的演化	49
2.4.2	基本 PWM DC/DC 转换器的级联	52
2.5	PWM DC/DC 转换器模块	55
2.6	PWM DC/DC 转换器所用元件及其特性	56
2.6.1	开关管	56
2.6.2	二极管	62
2.6.3	电感与电容	64
2.7	PWM DC/DC 转换器的功能、组成与它们之间的关系	68
2.7.1	PWM DC/DC 转换器的功能	68
2.7.2	PWM DC/DC 转换器的组成	68
2.7.3	PWM DC/DC 转换器之间的关系	69
	参考文献	71
第 3 章	PWM DC/DC 转换器的原理	72
3.1	Buck 降压式 PWM DC/DC 转换器	72
3.1.1	主电路组成和控制方式	72
3.1.2	电感电流连续时 Buck 转换器的工作原理和基本关系	72
3.1.3	电感电流断续时 Buck 转换器的工作原理和基本关系	77
3.1.4	电感电流连续的边界	77
3.1.5	Buck 降压式 PWM DC/DC 转换器的效率	80
3.2	Boost 升压式 PWM DC/DC 转换器	81
3.2.1	主电路组成和控制方式	81
3.2.2	电感电流连续时 Boost 升压式 PWM DC/DC 转换器的工作原理和基本关系	82
3.2.3	电感电流断续时 Boost 升压式 PWM DC/DC 转换器的工作原理和基本关系	84
3.2.4	电感电流连续的边界	85
3.3	Buck-Boost 升降压式 PWM DC/DC 转换器	86
3.3.1	主电路组成和控制方式	86
3.3.2	电流连续时 Buck-Boost 升压式 PWM DC/DC 转换器的工作原理和基本关系	88
3.3.3	电流断续时 Buck-Boost 转换器的工作原理和基本关系	89
3.3.4	电感电流连续的边界	90
3.4	Cuk PWM DC/DC 转换器	92
3.4.1	主电路组成和控制方式	92
3.4.2	电流连续时 Cuk 转换器的工作原理和基本关系	93
3.4.3	电流断续时 Cuk 转换器的工作原理和基本关系	95
3.4.4	两个电感有耦合的 Cuk 转换器	97
3.5	Zeta PWM DC/DC 转换器	98
3.5.1	主电路组成和控制方式	98



3.5.2	电流连续时 Zeta 转换器的工作原理和基本关系	99
3.5.3	电流断续时 Zeta 转换器的工作原理和基本关系	101
3.6	SEPIC PWM DC/DC 转换器	101
3.6.1	主电路组成和控制方式	101
3.6.2	电流连续时 SEPIC 转换器的工作原理和基本关系	103
3.7	正激式(Forward)PWM 转换器	104
3.7.1	主电路组成和控制方式	105
3.7.2	电流连续时正激式转换器的工作原理和基本关系	106
3.8	反激式(Flyback)PWM 转换器	109
3.8.1	主电路组成和控制方式	109
3.8.2	电流连续时反激式转换器的工作原理和基本关系	110
3.8.3	电流断续时 Flyback 转换器的工作原理和基本关系	112
3.9	推挽式(Push-Pull)转换器	113
3.9.1	推挽式逆变器	113
3.9.2	推挽式 PWM 转换器	115
3.9.3	推挽式转换器的铁心偏磁	117
3.10	半桥式(Half-Bridge) PWM DC/DC 转换器	118
3.10.1	半桥式逆变器	118
3.10.2	半桥式 PWM DC/DC 转换器	119
3.10.3	考虑漏感时半桥式 PWM 转换器的工作原理	122
3.11	全桥式(Full-Bridge)转换器	123
3.11.1	全桥式逆变器	123
3.11.2	全桥式 PWM DC/DC 转换器	126
3.11.3	全桥式转换器中直流分量的抑制	129
3.12	双管正激式(Switches Forward)PWM DC/DC 转换器	129
3.12.1	两个双管正激式转换器的串联输入/并联输出	131
3.12.2	并联输入、同一滤波电感输出电路	133
3.12.3	双管正激式转换器的能量反馈电路	134
3.13	有源钳位正激式转换器	135
3.14	各种 PWM DC/DC 转换器的电路类型及特点比较	136
3.15	几种三电平转换器	139
3.15.1	基本型三电平转换器	139
3.15.2	隔离式三电平转换器	146
3.16	电能双向流动的 PWM DC/DC 转换器	148
3.16.1	基本双向转换器电路的构成	148
3.16.2	推挽式双向转换器电路的构成	151
	参考文献	151



第 4 章 转换器的吸收电路与软开关技术	152
4.1 转换器中的吸收电路	152
4.1.1 吸收电路的作用	152
4.1.2 吸收电路的类型	155
4.1.3 关断吸收电路(turn-off Snubber)	156
4.1.4 开通吸收电路(turn-on Snubber)	157
4.1.5 组合吸收电路	158
4.1.6 LCD 吸收电路	160
4.1.7 广义软开关技术	161
4.2 PWM DC/DC 转换器的高频化与软开关技术	163
4.2.1 软开关技术与高频化	164
4.2.2 软开关技术的发展现状与分类	166
4.2.3 零电流开关和零电压开关	167
4.3 谐振转换器	169
4.3.1 串联谐振转换器和并联谐振转换器	169
4.3.2 串并联谐振转换器	169
4.3.3 ZCS/ZVS 准谐振转换器	170
4.4 多谐振转换器	172
4.5 ZCS-PWM 转换器	173
4.5.1 工作原理	173
4.5.2 参数设计	177
4.5.3 ZCS-PWM 转换器的基本电路族及优、缺点	178
4.6 ZVS PWM 转换器	180
4.6.1 工作原理	180
4.6.2 参数设计	184
4.6.3 ZVS PWM 转换器的基本电路族及优、缺点	185
4.7 零电压转换(ZVT)PWM 转换器	187
4.7.1 工作原理	187
4.7.2 辅助电路的参数设计	190
4.7.3 ZVT PWM 转换器的基本电路族及优、缺点	192
4.8 改进型 ZVT PWM 转换器	194
4.8.1 工作原理	194
4.8.2 辅助电路的参数设计	196
4.8.3 改进型 ZVT PWM 转换器的基本电路族及其优点	197
4.9 零电流转换(ZCT)PWM 转换器	199
4.9.1 工作原理	199
4.9.2 辅助支路的能量调节	203



4.9.3	参数设计	205
4.9.4	ZCT PWM 转换器的基本电路族及其优、缺点	207
4.10	改进型 ZCT PWM 转换器	208
4.10.1	工作原理	208
4.10.2	参数设计	213
4.10.3	改进型 ZCT PWM 转换器的基本电路族及其优、缺点	214
	参考文献	215
第 5 章	有源钳位技术与移相控制 ZVS PWM 转换器	216
5.1	有源钳位软开关转换技术	216
5.1.1	有源钳位正激转换器	217
5.1.2	参数设计	222
5.2	有源钳位 ZVS PWM 正激式转换器	223
5.2.1	有源钳位 ZVS PWM 正激式转换器的工作原理	224
5.2.2	有源钳位 ZVS PWM 正激式转换器的优点	226
5.3	ZVT PWM 正激式转换器	227
5.3.1	工作原理	227
5.3.2	参数设计	233
5.3.3	ZVT PWM 正激式转换器的优、缺点	234
5.4	ZVT 双管正激式转换器	235
5.4.1	工作原理	235
5.4.2	参数设计	240
5.4.3	ZVT 双管正激式转换器的优点	240
5.5	ZCT 双管正激式转换器	240
5.6	有源钳位反激式转换器	241
5.7	有源钳位反激-正激式转换器	242
5.8	移相控制 ZVS PWM DC/DC 全桥转换器	244
5.8.1	工作原理	244
5.8.2	两个桥臂实现 ZVS 的差异	249
5.8.3	实现 ZVS 的策略及次级占空比的丢失	249
5.8.4	整流二极管的换流	250
5.8.5	移相控制 ZVS PWM DC/DC 全桥转换器的特点与效率	253
5.9	移相控制 ZVZCS-PWM DC/DC 全桥转换器	254
5.9.1	工作原理	254
5.9.2	参数设计	259
5.9.3	移相控制 ZVZCS-PWM DC/DC 全桥转换器的优点与效率	260
5.10	移相控制 ZCS-PWM DC/DC 全桥转换器	260
5.10.1	工作原理	261



5.10.2	超前管和滞后管实现 ZCS 的差异	265
5.10.3	实现 ZCS 的策略及电流占空比的丢失	266
5.11	ZVS PWM 二极管钳位三电平 DC/DC 转换器	267
5.11.1	工作原理	267
5.11.2	实现 ZVS 条件和次级占空比的丢失	272
5.11.3	特点和效率	273
	参考文献	274
第 6 章	高频开关转换器中的磁性元件	275
6.1	概述	275
6.2	高频磁心的特性和参数	276
6.2.1	磁导率与常用参数式	277
6.2.2	磁滞回线	278
6.2.3	动态磁滞回线的测试	279
6.2.4	基本磁化曲线	280
6.2.5	不对称局部磁滞回线	281
6.2.6	伏秒积分	282
6.2.7	磁心损耗	283
6.3	磁性材料和磁心结构	283
6.3.1	开关电源常用的磁性材料	284
6.3.2	磁心结构形式(geometries)	287
6.4	电感	287
6.4.1	电感的基本公式和磁心气隙	288
6.4.2	电感元件储能与高频电感元件的等效电路模型	289
6.4.3	直流滤波电感	290
6.4.4	自饱和电感和可控饱和电感	292
6.5	变压器	294
6.5.1	励磁电感与漏电感	294
6.5.2	高频变压器模型	295
6.5.3	变压器的磁分析	296
6.5.4	平面变压器	297
6.5.5	空心 PCB 变压器	299
6.5.6	集成高频磁性元件	299
6.5.7	压电变压器	300
6.6	磁性元件中导体的集肤效应和邻近效应	301
6.6.1	集肤效应	301
6.6.2	邻近效应	305
6.7	高频变压器的设计方法	310





6.7.1	高频变压器的功率体积设计法	311
6.7.2	高频变压器的调整率体积法	323
6.7.3	高频变压器设计方法的例题	325
6.7.4	平面功率变压器的设计	330
6.8	电感器的设计方法	340
6.8.1	电感器的功率体积设计法	340
6.8.2	电感器的调整率体积设计法	346
6.8.3	无直流偏压的电感器设计	350
6.9	可饱和电感和磁放大器在开关转换器中的应用	352
6.9.1	可饱和电感基本物理特性及应用	352
6.9.2	磁放大器的基本原理及在转换器中的应用	355
6.9.3	可饱和电感与磁放大器的联合应用	359
	参考文献	361
第 7 章	高频开关转换器的输出同步整流技术	362
7.1	输出功率整流二极管	362
7.1.1	功率整流二极管的模型及主要参数	362
7.1.2	输出整流用的几种快速开关二极管	365
7.2	同步整流技术	367
7.2.1	同步整流的基本工作原理	369
7.2.2	同步整流管的主要参数	370
7.3	同步整流的驱动方式与 SR 的控制时序	371
7.3.1	同步整流的驱动方式	371
7.3.2	SR 的控制时序与同步整流电路	374
7.4	电压型自驱动方式与控制驱动方式	377
7.4.1	电压型自驱动方式	377
7.4.2	控制驱动方式	380
7.5	电流型自驱动方式与混合驱动方式	381
7.5.1	电流型自驱动方式	381
7.5.2	混合驱动方式	382
7.6	SR-Buck 转换器	383
7.7	SR-正激式转换器	384
7.7.1	有磁复位绕组的 SR-正激式转换器	384
7.7.2	SR-有源钳位正激式转换器	385
7.8	SR-反激式转换器	387
7.9	SR 在 DC/DC PWM 转换器中的应用举例	389
7.9.1	全波 SR 在半桥式 DC/DC PWM 转换器中的应用举例	389
7.9.2	倍流 SR 在半桥式 DC/DC PWM 转换器中的应用举例	392



7.9.3 倍流 SR 在全桥式 DC/DC PWM 转换器中的应用举例	398
参考文献	402
第 8 章 有源功率因数校正技术	403
8.1 功率因数和功率因数校正的主要方法	404
8.1.1 输入功率因数	404
8.1.2 对输入端谐波电流的限制	405
8.1.3 提高输入功率因数的主要方法	406
8.1.4 有源功率因数校正法的分类	406
8.2 非线性电路的功率因数和 THD	408
8.2.1 非线性电路功率因数的定义	408
8.2.2 PF 与 THD 的关系	409
8.3 单相 Boost PFC 转换器	410
8.3.1 DCM Boost PFC 转换器	410
8.3.2 CCM Boost PFC 转换器	411
8.3.3 CRM Boost PFC 转换器	413
8.3.4 Boost PFC 电路的主要优、缺点	414
8.4 APFC 的控制方法	415
8.4.1 电流峰值控制法	415
8.4.2 电流滞环控制法	416
8.4.3 平均电流控制法	417
8.5 PFC 集成控制电路	418
8.5.1 UC3854A/B	418
8.5.2 UC3855A/B	420
8.5.3 L6561	422
8.6 单相反激式 PFC 转换器	423
8.6.1 CCM 反激式 PFC 转换器	423
8.6.2 DCM 反激式 PFC 转换器	426
8.6.3 反激式 PFC 转换器的优、缺点	430
8.7 单级单开关 PFC 转换器	430
8.7.1 集成 PFC 整流器 - 调节器	432
8.7.2 BIFRED 转换器	432
8.7.3 BIBRED 转换器	435
8.7.4 集成 PFC 整流器 - 调节器的优、缺点	437
8.7.5 变频控制	438
8.7.6 S^4 PFC 正激式转换器	439
8.8 三相 PFC 转换器	440
8.8.1 三个单相 Boost PFC 转换器组成三相 PFC 整流器	441



8.8.2	三相单开关 DCM Boost 整流器	442
8.8.3	三相 CCM Boost 整流器	444
8.8.4	三相 CCM Buck 整流器	446
8.8.5	三相三电平 Boost PFC 转换器	447
8.8.6	空间相量控制	448
	参考文献	449
第 9 章	高频开关转换器的控制电路与驱动电路	451
9.1	驱动电路	451
9.1.1	对驱动电路的要求	451
9.1.2	集成电路直接驱动	452
9.1.3	加入驱动功率放大级驱动	453
9.1.4	用变压器耦合驱动	453
9.1.5	光耦合器驱动器	454
9.2	PWM 控制器	455
9.2.1	电压模式 PWM 控制器	455
9.2.2	电流模式 PWM 控制器	456
9.3	电压型控制	457
9.4	电流型控制	459
9.4.1	电流峰值控制	460
9.4.2	平均电流型控制	462
9.4.3	滞环电流型控制	463
9.5	电荷控制	464
9.6	单周期控制	465
9.7	前馈控制	467
9.8	数字控制(离散控制)	468
9.8.1	数字控制的特点	468
9.8.2	离散 PID 算法	469
9.8.3	改进的离散 PID 算法	470
9.9	控制电路与驱动电路的隔离方法	471
9.10	L5991 电流模式控制芯片	473
9.10.1	L5991 的功能及内部框图	473
9.10.2	典型应用	481
9.11	UCC38500 控制芯片	484
9.11.1	UCC38500 简介	484
9.11.2	UCC38500 的实际应用	486
	参考文献	489
第 10 章	开关电源设计中的两项新技术	490



10.1 智能功率开关	490
10.1.1 工作模式及主要性能	490
10.1.2 分类及工作原理	491
10.1.3 智能化的发展	496
10.2 智能功率开关 IR4010 的应用举例	498
10.2.1 IR4010 功率开关的性能参数	498
10.2.2 应用电路举例	500
10.3 电压调整器模块 VRM 简介	503
10.4 低输入电压的 VRM	505
10.4.1 SR-Buck 转换器	505
10.4.2 多通道 SR-Buck 转换器	506
10.4.3 多通道 SR-Buck 转换器的设计考虑	507
10.5 高电压输入的 VRM	508
10.6 元件和线路的寄生参数对 VRM 瞬态性能的影响	509
10.6.1 电容 ESR 和 ESL 的影响	509
10.6.2 改善 VRM 输出瞬态响应的办法	510
10.6.3 微处理器与 VRM 接口的仿真模型	510
参考文献	512
第 11 章 开关转换器并联系统的均流技术	513
11.1 开关转换器的并联	513
11.2 下垂法	515
11.3 主从均流法	518
11.4 自动均流法	519
11.5 按平均电流值自动均流法	521
11.6 热应力自动均流法	522
11.7 民主均流法	523
11.7.1 民主均流法的原理	523
11.7.2 UC3907 均流控制器芯片	524
11.8 数字均流控制的实现	526
11.9 ISL6140 热插拔芯片的应用	528
11.9.1 ISL6140 芯片的功能简介	528
11.9.2 外围元件参数的计算	530
11.9.3 设计中应注意的几个问题	532
参考文献	534
第 12 章 开关电源的瞬态建模与分析	535
12.1 开关电源的瞬态建模分析	535
12.1.1 瞬态建模分析的目的	535





12.1.2	瞬态模型	535
12.2	状态空间平均法	537
12.2.1	基本概念	537
12.2.2	基本假设条件	538
12.2.3	分析方法和步骤	539
12.2.4	Boost 转换器状态空间平均模型	540
12.3	PWM 转换器频域模型	546
12.3.1	PWM 转换器小信号等效电路规范型模型	546
12.3.2	Cuk 转换器小信号等效电路的规范型模型	547
12.3.3	PWM 转换器小信号等效电路的规范型模型参数	548
12.3.4	PWM 转换器的传递函数	549
12.3.5	Buck-Boost 转换器的传递函数	550
12.3.6	Buck 族和 Boost 族 PWM 转换器	550
12.4	平均电路法	551
12.4.1	平均变量和平均电路	551
12.4.2	平均开关函数	551
12.4.3	开关网络的平均模型	552
12.4.4	三端 PWM 开关模型法	552
12.4.5	考虑寄生参数的 PWM 转换器平均电路的模型	558
	参考文献	562
第 13 章	开关电源的频域分析与综合	563
13.1	时域分析简介	564
13.1.1	时域数学模型与系统的时域响应	564
13.1.2	自动调节系统的时域性能指标	565
13.1.3	时域法综合系统的步骤	566
13.2	频域模型分析	566
13.2.1	传递函数	566
13.2.2	频率响应	567
13.2.3	对数频率特性	567
13.2.4	拉普拉斯变换简表	569
13.3	开关电源系统的频域模型及分析	569
13.3.1	方块图	569
13.3.2	系统的稳定性和稳定裕量	570
13.3.3	频域性能指标	571
13.3.4	极点和零点	572
13.4	系统频率响应与瞬态响应的关系	573
13.4.1	频率尺度与时间尺度成反比	573



13.4.2	频段特征、频率特性与系统的关系	574
13.4.3	阻尼比 ζ 对系统瞬态响应的影响	574
13.5	电压型控制开关电源的频域模型	575
13.5.1	方块图与传递函数	575
13.5.2	抗电网电压扰动能力和抗负载扰动能力	579
13.6	电压控制器	580
13.6.1	电压控制器的传递函数与作用	580
13.6.2	补偿后电源系统的频率特性要求与控制器的类型	581
13.6.3	带积分环节的控制器与开关电源中控制器特性的分析举例	582
13.6.4	增设单极点、单零点或双极点、双零点的 PI 补偿网络	584
13.7	开关电源系统的频域设计(综合)	587
13.8	双环控制开关电源系统的瞬态建模分析	587
13.8.1	电流型控制的开关电源系统	588
13.8.2	Tellegen 定理	589
13.8.3	Buck-Boost 开关转换器的传递函数	589
13.8.4	功率守恒建模方法	590
13.8.5	电流控制的开关电源系统的一般设计步骤	592
13.8.6	UPF Boost PWM 转换器瞬态建模分析	592
13.9	非最小相位系统	596
13.9.1	最小相位系统与非最小相位系统的比较	596
13.9.2	非最小相位系统的物理特征	597
13.9.3	非最小相位系统的控制器设计	597
	参考文献	598
第 14 章	开关电源的 EMC 设计、可靠性设计、热设计和最优设计与仿真	600
14.1	开关电源中的电磁干扰问题	601
14.1.1	开关电源产生电磁干扰的机理	601
14.1.2	开关电源的电磁噪声耦合通道特性	605
14.1.3	开关电源运行中的电磁、干扰及其抑制	610
14.2	开关电源的电磁兼容设计	614
14.2.1	输入端滤波器的设计	614
14.2.2	辐射 EMI 的抑制措施	616
14.2.3	传导干扰的解决方法	616
14.2.4	接地技术的应用	617
14.2.5	屏蔽技术、元件布局与印制电路板布线技术	618
14.3	开关电源的可靠性设计	620
14.3.1	可靠性的定义、指标及影响的因素	621
14.3.2	可靠性设计的原则与可靠性设计	622

