



开关电源设计与制作系列丛书

开关电源设计 与制作基础

◎ 蔡宣三 倪本来 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

开关电源设计与制作系列丛书

开关电源设计与制作基础

蔡宣三 倪本来 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书作为高频逆变开关电源技术的基础和门槛,全面系统地讲解了当代硬/软开关高频逆变电路的特点、对偶原理、控制方法、瞬态和频域分析、高频磁路及集成磁件,以及吸收电路、有源功率因数校正、同步整流、并联均流、集成模块 IPEM 等实用技术,可作为从事开关电源和高频变换研发的工程技术人员的工具书,也可供高等院校相关专业师生参考。

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

开关电源设计与制作基础/蔡宣三,倪本来编著. —北京:电子工业出版社,2012. 6
(开关电源设计与制作系列丛书)

ISBN 978-7-121-17055-3

I. ①开… II. ①蔡… ②倪… III. ①开关电源-设计 ②开关电源-制作 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 099023 号

责任编辑:苏颖杰(sujj@phei.com.cn)

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

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:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:419.2 千字

印 次:2012 年 6 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.80 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 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。

“开关电源设计与制作系列丛书”编委会

主任：倪本来

副主任：陈永真 赵丽松

委员（按姓氏笔画排序）：

刁成明	马传添	王 聪	王其英
艾多文	吕征宇	任元元	刘胜利
苏颖杰	李文华	李龙文	李宗光
李厚福	何 发	张广明	张卫平
张志国	张忠相	杨 耕	杨继深
庚 雷	陈建业	赵争鸣	赵金龙
钱振宇	倪海东	徐之文	徐兰筠
徐德鸿	路秋生	腾 霖	

从 书 序

开关电源是电源“家族”中的重要成员，是发展较快的前沿电源技术。在电源领域还有不间断电源、逆变器、变频器、交流电源、焊接电源、充电器、精密电源、工业电源、医用电源、军用电源、特种电源等，但几乎所有的电源迟早都会向开关电源靠拢。传统的电源技术正在让位于高频开关电源技术，传统应用领域中的电源正逐渐被新的开关电源升级换代。新能源的开发利用又催生了绿色电能变换这一最能体现开关电源高频逆变核心技术应用的庞大的市场需求。越来越多的电源科技工作者、新电源产品的开发者、各行业传统电源产品面临升级换代的革新者都希望读到最新的有关开关电源的实用设计指导书。这正是编撰“开关电源设计与制作系列丛书”的初衷。丛书内容围绕实用设计展开，为设计者提供实用电路、关键技术、简明实用的设计方法、成功案例，将成为读者得心应手的案头书。

丛书目前包括《开关电源设计与制作基础》、《反激式开关电源原理与设计》、《开关电源设计与制作实践》、《开关电源模块化与数字化技术》、《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》、《开关电源计算机仿真技术》。计划出版的还有《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术与应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等。丛书作者均为当今知名的电源技术领域专家。

辽宁工业大学陈永真教授编著的《反激式开关电源原理与设计》和中电公司刘胜利高级工程师编著的《开关电源设计与制作实践》，详解了单端变换、双正激变换、半桥变换和全桥变换等常见的几种典型开关电源电路原理、设计和制作要领，均为编著者长期工程实践的总结。

开关电源的数字化控制代表了开关电源技术一个重要的发展方向，其发展前景较之传统的模拟、开关模拟混合控制有划时代的突破。上海福基公司庚雷高级工程师、北京半导体器件五厂微电子研究所李龙文高级工程师和中电公司刘胜利高级工程师共同编著的《开关电源模块化与数字化技术》，提供的是大家较为熟悉、应用较广的 Vicor 电源模块，其他优秀的模块电源如果存在类似的应用问题，可以相互借鉴。该书提供的资料可将初涉该领域的工程师们引领入门。

电磁兼容工程实用技术在开关电源中的地位极其重要，但往往在设计初期被忽视。全国电磁兼容标准化技术委员会委员、上海三基电子工业有限公司总工程师钱振宇研究员在《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》一书中，以生动的笔触进行了详尽的具有可操作性的介绍。

开关电源的现代设计离不开计算机仿真，然而借助现有的仿真软件针对开关电源的应用设计，系统而透彻的介绍并不多见。清华大学陈建业教授编著的《开关电源计算机仿真技术》一书能帮助读者在开关电源的计算机仿真技术方面打下坚实的基础。

《开关电源设计与制作基础》是清华大学蔡宣三教授生前遗墨，曾经在《电源世界》期刊由倪本来主编编辑连载。蔡宣三教授的关于开关电源基础原理的叙述是此类文字中的经典之一。蔡宣三教授曾担任中国电源学会理事长，对我国电源技术的发展作出了重大贡献。谨

以此书纪念蔡宣三教授。

在能源短缺和环境污染日益严重的今天，绿色能源向电能的转换具有重大意义。开关电源及其高频逆变核心技术在绿色能源转换中起着关键性作用。为此，丛书选编了《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术与应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等相关图书，已列入出版计划，希望它们能在改变人们衣食住行的绿色浪潮中推波助澜。

丛书由电能变换专家、中国电源学会副理事长、北京富来电能设备公司倪本来高级工程师担任总策划。参与丛书策划，为丛书提供资料、建议，以及帮助审稿的人员还有北京信息职业技术学院路秋生教授，中国矿业大学王聪教授，工业与信息化部华北计算所王其英高级工程师，中国计量科学研究院于百江高级工程师，浙江大学吕征宇教授，北方工业大学张卫平教授，中国航天科技集团张志国研究员、张忠相研究员，中国科学院计算技术研究所张广明研究员，电子工业出版社赵丽松编审和苏颖杰编辑等。

限于水平，书中错误在所难免，恳请读者斧正。

“开关电源设计与制作系列丛书”编辑委员会

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 开关电源技术的发展	1
1.1 开关电源技术的发展进程	1
1.2 20 世纪推动开关电源发展的主要技术	1
1.2.1 新型功率半导体器件	1
1.2.2 软开关技术	2
1.2.3 控制技术	2
1.2.4 有源功率因数校正技术	3
1.2.5 高频磁元件	3
1.2.6 饱和电感的应用	5
1.2.7 低电压、大电流输出 DC-DC 变换器	6
1.2.8 分布电源及并联均流技术	7
1.2.9 电源智能化技术	7
1.2.10 开关电源的 EMI 与 EMC	7
1.3 开关电源技术发展方向	7
参考文献	10
第 2 章 DC-DC 开关型功率变换器的基本电路	11
2.1 DC-DC 开关型功率变换器的基本电路	11
2.2 开关变换器的等效电路	13
2.3 开关变换器的对偶关系	13
2.4 有隔离变压器的单端开关变换器	15
2.5 SEPIC 和 Zeta 变换器的性质和特点	16
参考文献	17
第 3 章 高频软开关变换器	18
3.1 谐振变换器和有源钳位 ZVS 变换器	18
3.1.1 引言	18
3.1.2 谐振变换器	19
3.1.3 有源钳位软开关变换技术	23
3.2 软开关 PWM 变换器	27
3.2.1 ZS-PWM 变换器	27
3.2.2 ZT-PWM 变换器	29
3.2.3 移相控制全桥 (FB) ZVS-PWM 变换器	34
3.2.4 PS FB 混合 ZCZVS-PWM 变换器	36
3.2.5 广义软开关 PWM 变换器	38
参考文献	38

第 4 章 开关型功率变换器的控制	39
4.1 概述	39
4.2 电压型控制	39
4.3 前馈控制	41
4.4 电流型控制	42
4.5 其他控制方法	45
参考文献	48
第 5 章 开关电源的吸收电路	49
5.1 吸收电路的作用	49
5.2 吸收电路的类型	52
5.2.1 关断吸收电路 (turn-off snubber)	52
5.2.2 开通吸收电路 (turn-on snubber)	53
5.2.3 组合吸收电路	54
5.2.4 LC 吸收电路	55
5.2.5 吸收电路和开关过程的“软化”	56
参考文献	58
第 6 章 高频开关变换器中的磁性材料和磁元件	59
6.1 高频磁心的材料、特性和参数	59
6.1.1 概述	59
6.1.2 磁材料特性及参数	60
6.1.3 高频磁元件的磁心结构和磁材料	65
6.2 电感元件	67
6.2.1 电感的基本公式	68
6.2.2 磁心气隙 (air gap)	68
6.2.3 电感元件储能 W	69
6.2.4 高频电感元件的等效电路模型	69
6.2.5 开关电源输出滤波电感分析	70
6.2.6 自饱和电感 (saturable inductor)	71
6.2.7 可控饱和电感 (controlled saturable inductor)	72
6.3 变压器	73
6.3.1 励磁电感与漏电感	73
6.3.2 高频变压器模型	74
6.3.3 开关电源变压器的磁分析	74
6.4 平面 (planar) 变压器	76
6.5 空心 PCB 变压器	77
6.6 集成高频磁元件	77
参考文献	79
第 7 章 有源功率因数校正技术	80
7.1 有源功率因数校正技术介绍	80

7.1.1	AC - DC 整流电路	80
7.1.2	非线性电路的功率因数和 THD	83
7.1.3	Boost PFC 电路	84
7.1.4	APFC 的控制方法	87
7.1.5	PFC 集成控制电路	90
7.2	三相 PFC 变换器	91
7.2.1	三相桥式整流电路	91
7.2.2	三个单相 Boost PFC 变换器组成三相 PFC 整流器	92
7.2.3	三相 DCM 单开关 Boost 整流器	93
7.2.4	三相 CCM Boost 整流器	95
7.2.5	空间矢量控制	96
7.2.6	三相 CCM Buck 整流器	98
7.2.7	三相三电平 Boost PFC 变换器	99
7.2.8	三相 Boost PWM 整流器瞬态建模分析	100
7.3	单相反激 PFC 变换器	101
7.3.1	CCM 反激 PFC 变换器	101
7.3.2	DCM 反激 PFC 变换器	104
7.3.3	反激 PFC 变换器的优缺点	108
7.4	单级 PFC 变换器	108
7.4.1	概述	108
7.4.2	集成 PFC 整流器 - 调节器	110
	参考文献	118
第 8 章	同步整流技术	119
8.1	概述	119
8.2	同步整流技术的基本原理	120
8.2.1	SR 工作原理	120
8.2.2	同步整流管 SR 的主要参数	121
8.3	同步整流驱动方式	122
8.3.1	外驱动同步整流技术	122
8.3.2	电压型自驱动同步整流	122
8.3.3	电流型自驱动同步整流	123
8.4	同步整流电路	124
8.4.1	全波 SR 电路	124
8.4.2	倍流 SR 电路	124
8.5	SR - Buck 变换器	125
8.6	SR - 正激变换器	125
8.6.1	有磁复位绕组的 SR - 正激变换器	125
8.6.2	SR - 有源钳位正激变换器	126
8.6.3	SR 双管正激变换器	127

8.7	SR - 反激变换器	128
	参考文献	129
第9章	DC - DC 变换器并联系统的均流技术	130
9.1	概述	130
9.2	下垂法	131
9.3	主从均流法	133
9.4	自动均流法	134
9.5	热应力自动均流法	136
9.6	民主均流法	136
9.6.1	民主均流法的原理	136
9.6.2	均流控制器集成电路 UC3907 的简介	137
	参考文献	138
第10章	开关电源中的磁放大器式输出电压调节器	139
10.1	概述	139
10.2	高频磁放大器铁心磁性材料	140
10.2.1	非晶态软磁合金	140
10.2.2	铁基超微晶合金	141
10.3	开关电源中高频磁放大器调节器的工作原理	143
10.4	应用举例	146
第11章	开关电源的瞬态建模和分析	148
11.1	概述	148
11.2	状态空间平均法	150
11.2.1	基本概念	150
11.2.2	基本假设条件	151
11.2.3	状态空间分析步骤	151
11.3	平均电路法	158
11.4	三端 PWM 开关模型法	160
11.4.1	三端 PWM 开关的平均电路模型	160
11.4.2	规范形开关单元及其平均电路模型	162
11.4.3	三端 PWM 开关的小信号平均电路模型	162
11.4.4	PWM 开关变换器的小信号平均电路模型	163
11.5	考虑寄生参数的 PWM 开关变换器平均电路模型	165
11.5.1	Buck 变换器平均电路模型的修正	165
11.5.2	等效平均电阻	166
11.5.3	考虑寄生参数的 Buck 变换器大信号电路模型	167
11.6	双环控制的开关电源系统瞬态建模分析——功率守恒法	169
11.6.1	引言	169
11.6.2	电流型控制的开关电源系统	170
11.6.3	电流型控制开关电源系统的功率守恒建模法	172

11.6.4	高功率因数 (UPF) Boost PWM 电源瞬态建模分析	175
11.6.5	非最小相位系统	177
	参考文献	179
第 12 章	开关电源的频域分析与综合	180
12.1	概述	180
12.1.1	时域性能指标	180
12.1.2	频域模型	181
12.1.3	对数频率特性 (Bode 曲线)	182
12.1.4	系统的稳定性和稳定裕量	182
12.1.5	频域性能指标	183
12.2	二阶控制系统	184
12.2.1	二阶系统的时域响应	184
12.2.2	传递函数	185
12.2.3	频率响应	185
12.2.4	二阶系统的对数频率特性	185
12.2.5	拉普拉斯变换简表	186
12.3	极点和零点	186
12.3.1	RHP 和 LHP 极点和零点	186
12.3.2	一阶系统的零、极点举例	187
12.3.3	二阶系统的零、极点举例	187
12.4	系统频率响应与瞬态响应的关系	188
12.5	电压型控制的开关电源的频域模型	190
12.5.1	开关电源框图	190
12.5.2	开关变换器的控制 - 输出传递函数	191
12.5.3	反馈通道传递函数 $H(s)$	192
12.5.4	电源系统的开环传递函数 $T_o(s)$ 及闭环传递函数 $T_c(s)$	192
12.5.5	音频纹波衰减率 (audio-susceptibility)	192
12.5.6	开关电源的抗负载扰动能力	193
12.6	电压控制器	193
12.6.1	电压控制器的传递函数	193
12.6.2	控制器的作用	194
12.6.3	对补偿后电源系统的频率特性要求	194
12.6.4	控制器 (补偿网络) 的类型	194
12.6.5	比例 - 积分 (PI) 控制器	195
12.6.6	增设单极点、单零点的 PI 网络	196
12.6.7	增设双极点、双零点 PI 补偿网络	197
12.7	频域设计 (综合)	198
第 13 章	集成电力电子模块 (IPEM) 综述	199
13.1	集成电力电子模块 (IPEM) 技术的提出	199

13.2	国际电力电子界研究开发 IPEM 的现状	201
13.2.1	美国 PEBB 计划	201
13.2.2	美国电力电子系统中心的建立和 IPEM 计划	203
	参考文献	206
第 14 章	磁路及集成磁件	207
14.1	磁路的基本概念和基本定律	207
14.2	电感器和变压器的磁路模型	210
14.2.1	磁心电感的磁路模型	210
14.2.2	磁心线圈的电路模型	210
14.2.3	开气隙单线圈磁心电感器的磁路模型	211
14.3	具有耦合电感的开关变换器的磁路电路分析	214
14.4	具有集成磁件的开关变换器的磁路电路分析	216
14.5	集成磁件的基本综合方法	221
14.6	电感器和变压器的设计方法	223
14.6.1	电感器的设计	223
14.6.2	变压器的设计	225
14.6.3	电感器和变压器设计举例	227
	参考文献	232
第 15 章	开关变换器电路的对偶分析	233
15.1	平面电路的对偶性质	233
15.2	开关变换器的基本对偶关系	236
15.2.1	导通比的对偶关系	236
15.2.2	半导体开关元件的对偶规则	237
15.2.3	开关变换器的对偶	239
15.3	直流隔离开关变换器的对偶	242
15.3.1	理想变压器的对偶元件	242
15.3.2	全耦合变压器模型的对偶	244
15.3.3	单端正激开关变换器的对偶	245
15.3.4	单端反激开关变换器的对偶	246
15.3.5	多路输出反激开关变换器的对偶	246
15.4	开关变换器的双向变换	248
15.5	PWM 开关变换器小信号线性等效电路的对偶分析	249
	参考文献	251

第 1 章 开关电源技术的发展

1.1 开关电源技术的发展进程

20 世纪开关电源技术发展的历程表明，高功率密度、高效率、高性能、高可靠性是开关电源的发展方向。

随着 ULSI 尺寸不断减小，供电电源的尺寸与微处理器相比要大得多，人们在减小开关电源的体积、减轻开关电源质量方面做了不少工作。发展小型化轻型电源，对便携式电子设备（如移动电话等）尤为重要。

为了实现高功率密度，必须提高 PWM 开关电源工作频率。1980 年前，功率变换器的开关频率为 20 ~ 50kHz，从 20 世纪 80 年代起，提高开关频率成为减少开关电源尺寸的最有效手段，同时也改善了电源的动态性能。20 世纪 70 年代，国际上掀起的所谓 20kHz 的革命成为开关电源技术发展的历史转折点，同时也引发了 PWM 开关变换的研究热潮。

到了 20 世纪 90 年代，开关电源工作频率的提高受到开关损耗的制约，进一步提高开关电源功率密度和效率遭遇了瓶颈。软开关的新思维在 90 年代初开始萌芽，从此开关电源技术的发展进入了新的历史时期。经过 20 年的努力，到了 21 世纪初，高频 PWM 软开关技术日臻完善，工作频率达兆赫级的开关电源已进入商业领域。

开关电源的高频化引出一系列的新技术跟进。例如，磁性材料的高频化，以及平面型高频电感变压器的构造理念的形成；功率集成器件突破了单一的高频电力电子开关器件，将控制、驱动、保护、智能化功能等统统集成到薄膜和厚膜的模块里，使制造简化；高频开关电源的硬件高度紧凑集中，电磁兼容性问题不容忽视；无论功率集成还是分立元器件的主电路，在设计时越来越依赖仿真软件，彻底改变了研发的程序和教学模式。

开关电源技术下一步的发展动向如何？无疑是模块化和数字化，这是科技发展和社会需求所致。开关电源整机需要进一步集约化、智能化，以满足时代进步的需求。

1.2 20 世纪推动开关电源发展的主要技术

1.2.1 新型功率半导体器件

20 世纪 90 年代，功率半导体器件有许多新的进展，主要有以下几方面。

① 功率 MOSFET 和 IGBT 已完全可代替功率晶体管（GTR）和中小电流的晶闸管，使实现开关电源高频化有了可能。超快恢复功率二极管和 MOSFET 同步整流技术的开发，也为研制高效率或低电压输出的开关电源创造了条件。

② 功率半导体器件的水平超过预测，电压、电流额定值分别达到：IGBT—3300V，



1200A 和 2500V, 1800A; Power MOS-FET—500V, 240A; GCT (Gate Commutated Turn-off Thyristor) —4.5kV, 4kA, 可望取代 GTO; 二极管—5000V, 4000A。

③ 功率半导体器件的晶片理想材料是碳化硅 (SiC), 已做出 25mm, 40mm 晶片, 并试制出一批 SiC 器件样品, 如肖特基二极管—1750V, 70mA, 正向压降 $V_f = 1.3V$; 功率 MOS-FET—750V, 15mA, $R_{\theta} = 66m\Omega \cdot cm^2$; 晶闸管—950V, 6A, 通态压降 3.67V。但 SiC 器件要达到实用化的要求, 还需要一定时间, 价格要进一步下降, 如小于 100 美元/片。

④ 20 世纪 80 年代, 将功率器件与驱动、智能控制、保护、逻辑电路等集成封装, 称为智能功率模块 (IPM) 或智能功率集成电路 (Smart Power IC)。它与 VLSI 的区别是, IPM 工作电压高, 可达 15V, 环境温度可达 +125℃。

20 世纪 90 年代, 大规模分布电源系统的发展将 IPM 的设计观念推广到更大容量、更高电压的集成电力电子电路, 并提高了集成度, 称为集成电力电子模块 (IPEM)。它将功率器件与电路、控制, 以及检测、执行等元器件集成封装, 得到标准的、可制造的模块, 既可用于标准设计, 也可用于专用、特殊设计。优点是可快速高效为用户提供产品, 显著降低成本, 提高可靠性。

进入 21 世纪, 功率半导体器件的商业化水平已经很高, IGBT 容量已达 4500A/1700V, 能够耗散 15kW 功率; IPM 智能功率模块 7 单元 150A、1200V 已经流通多年。功率 MOS-FET、快恢复二极管、整流桥、驱动 IC 等都不可同日而语。这些开关电源基础器件的长足进步, 为开关电源的发展提供了重要的物质保证。

1.2.2 软开关技术

PWM 开关电源按硬开关模式工作, 开关过程中, 开关器件的电压和电流波形有交叠, 因而开关损耗大。PWM 开关电源高频化可以缩小体积和质量, 但频率越高, 开关损耗越大。为此必须研究开关电压和电流波形不交叠的技术, 即所谓零电压开关 (ZVS) 和零电流开关 (ZCS) 技术, 又称软开关技术 (相对于 PWM 硬开关技术而言)。

20 世纪 90 年代中期, 30A/48V 开关变换器采用移相全桥 ZVS-PWM 技术后, 质量为 7kg, 比用 PWM 技术的同类产品下降 40%。软开关技术的开发和应用提高了开关电源的效率, 据说, 最近国外小功率 DC-DC 开关电源模块 (48V/12V) 总效率可达 96%, 48/5V 产品可达 92%~93%。20 世纪末, 国产的通信用 50~100A 输出、全桥移相 ZVZCS-PWM 开关电源模块的效率超过 93%。

1994 年 2 月, IEEE 电力电子学会组织“功率变换技术 2000 年展望专题研讨会”, 就 DC-DC 及 AC-DC 功率变换器的发展趋势与需求进行探讨。会议指出^[3], “高功率密度 DC-DC 零电压开关变换器”与开关器件性能、无源元器件性能、封装技术等有很大关系。并预测, 与 1994 年对比, 到 2000 年, 在保证可靠性增加一倍的基础上, 功率变换器成本将降低一半, 功率密度可提高一倍。现在, 开关变换器产品已超过这一目标。

1.2.3 控制技术

由于开关变换器的强非线性, 以及它具有的离散和变结构的特点, 负载性质也是多变



的,主电路的性能必须满足负载大范围的变化,所有这些使开关变换器的控制问题和控制器的设计较为复杂。一些新的控制方法,如自适应、模糊控制、神经网络控制及各种调制策略在开关电源中的应用,已引起人们的注意。

电流型控制及多环控制 (multi-loop control) 已在开关电源中得到较广泛的应用;电荷控制 (charge control)、一周期控制 (one cycle control)、 H_{∞} 控制、DSP 控制等技术的开发及相应专用集成控制芯片的研制,使开关电源动态性能有很大提高,电路也大幅度简化。

1.2.4 有源功率因数校正技术

由于输入端有整流元件和滤波电容,一大类整流电源供电的电子设备,其电网侧(输入端)功率因数仅为 0.65,而用有源功率因数校正技术(简称 APFC)可提高到 0.95 ~ 0.99,既治理了电网的谐波“污染”,又提高了电源的整体效率。单相 APFC 国内外开发较早,技术已较成熟;三相 APFC 则类型较多,还有待发展。

国内通信电源专业工厂已将有源功率因数校正技术应用于输出 6kW、100A 的一次电源中,输入端功率因数可达 0.92 ~ 0.93。

1.2.5 高频磁元件

1. 平面磁心及平面变压器技术

平面变压器适用于薄型 (low profile) 高频开关变换器,其厚度小于 1cm,呈扁平状。平面变压器要求磁心、绕组都是平面结构,如图 1.1 所示。绕组采用铜箔或板形印制电路,省去绕组骨架,有利于散热,漏感 L_{lk} 小,集肤效应损耗小,用于便携式 (por-table) 电子设备电源及板上电源。平面变压器的性能与诸多因素有关,如绕组结构与布置、端部设计、铜片厚度、磁心几何尺寸等。现在国际上正在用二维有限元法研究 R_{AC} 和 L_{lk} 。设计最小的绕组结构,并开发平面变压器的优化设计软件等。

据报道,国外已有多家公司开发了平面变压器。5W ~ 20kW 平面变压器的体积及功率密度仅为传统高频变压器的 20%,一个手提箱内可放总功率达几十千瓦的十几种平面变压器。效率为 97% ~ 99%;工作频率为 50kHz ~ 2MHz;漏感小于 0.2%;EMI 很小。

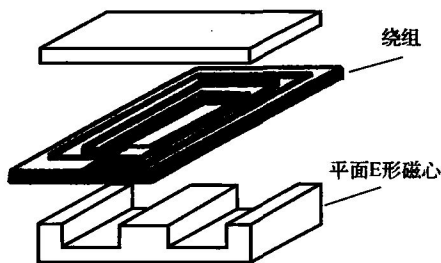


图 1.1 平面变压器

2. 集成磁元件

将多个磁元件(如变压器和电感)集成在一个磁心上如图 1.2 所示,称为集成 TL 磁元件,可减少变换器体积,降低损耗。

国外已有集成磁元件 (Integrated Magnetics, IM) 变换器,功率为 50W,有 5V 及 15V 两路输出的正激 IM 变换器,频率为 100kHz,变压器和输出滤波电感集成在一个磁心上。例



如，应用混合功率封装技术和集成磁技术使航空用 0.5MHz、薄型 100W 半桥式 DC - DC 变换器的厚度仅 0.21in，功率密度达 $150\text{W}/\text{in}^3$ 。南非 Hofsajer (PESC, 1997) 报道了研究集成磁电元件的成果，将 $5\text{kV} \cdot \text{A}$ 、 $f = 25\text{kHz}$ 串联谐振变换器的 LC 谐振元件 ($C = 500\text{nF}$ ， $L = 60\mu\text{H}$) 和变压器 (电压比 430:80) 集成在一个平面磁心上，称为 LCT 集成元件。

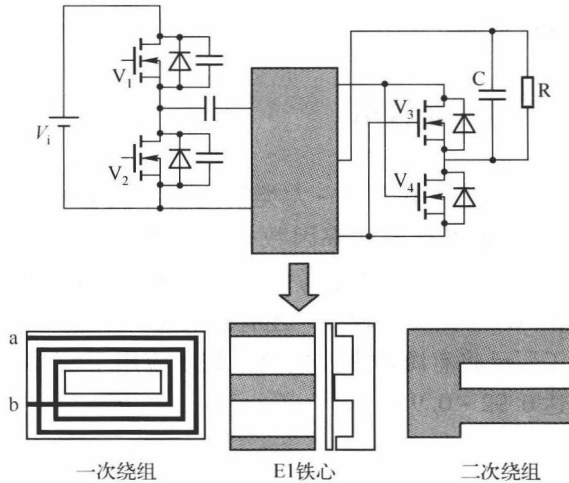


图 1.2 集成 TL 磁元件的例子

另一种集成磁技术是阵列式磁元件，将电路中磁元件离散化，形成分布式阵列布置，或形成磁结构层，使磁结构与电路板或其他器件紧密配合，实现集成化。

3. 用微加工 (micro-fabrication) 技术研制兆赫级高频变换器的磁元件

微加工是指 Fine Patterning 和薄膜制作技术，可减少磁心和绕组中的损耗，使变压器面积小于 10mm^2 ，还有可能像 VLSI 那样制造集成功率电子电路，将磁元件、功率电路、控制电路集成在硅片上。借用录音磁带的薄膜合金材料，可使高频磁元件的磁密增高。加州大学 Berkely 分校微加工实验室已研制成 10MHz 变压器，开发了最优设计软件，变压器单位面积功率为 $20\text{W}/\text{cm}^2$ ，效率可达 90% 以上。

4. 压电变压器

压电 (piezo-electric) 变压器简称 PET，实际上已不属于磁元件的范围。它是利用压电陶瓷材料的电压 - 机械振动 - 电压变换性质传送能量的。在高频功率变换器中应用，可实现轻、小、薄和高功率密度，是 20 世纪 90 年代国际功率变换领域的热点之一。研究内容包括压电材料的损耗评估、PET 设计计算方法、仿真、参数分析、有限元分析、振动速度极限，PET 的高频性能等。PET 在高频变换器中的应用已有报道，如输出 24W、12V 的 2MHz DC - DC 变换器 (其中 PET 电压比为 5:1)；输出 2W，1200V 的日光灯电源 (PET 电压比为 1:20)；冷阴极荧光灯和霓虹灯逆变器等。图 1.3 所示为 DC - DC 变换器中的 PET，其输入为有源钳位 ZVS 逆变电路，产生梯形波交流电，输出为整流滤波电路，类似串并联谐振电路。