

KAIGUAN DIANYUAN
DIANCI JIANRONGXING

开关电源 电磁兼容性

◎ 何宏 魏克新 王红君 李丽 著 ◎



国防工业出版社
National Defense Industry Press

开关电源电磁兼容性

何宏 魏克新 王红君 李丽 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书共分8章:第1章阐述了国内外开关电源的发展动态、开关电源的分类和主要技术指标;第2章给出了电磁兼容的基本概念和原理,并用周期性函数的傅里叶变换和非周期性干扰信号的频谱分析对电磁干扰(骚扰)进行数学描述;第3章对干扰耦合机理进行了详细的分析,分别是传导耦合、高频耦合和辐射耦合;第4章讨论了开关电源强制性产品认证中的电磁兼容问题及适用于开关电源电磁兼容性的有关标准;第5章详细阐述开关电源电磁兼容性测试技术,重点介绍了传导骚扰测试、辐射骚扰测试和功率吸收钳测试技术;第6章给出了开关电源电磁兼容性设计,通过对开关电源产生噪声机理的分析,给出开关电源电磁干扰的抑制措施,并使用谐波平衡有限元法分析高频开关电源;第7章讨论了开关电源印制电路板PCB的电磁兼容设计;第8章介绍了开关电源的最优化和可靠性设计方法。

本书适合作为电气与电子工程、信息和计算机技术、生物医学工程、自动控制与机电一体化、仪器和测试技术等专业师生的教学参考书,还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源电磁兼容性/何宏等著. —北京:国防工业出版社,2008.12

ISBN 978-7-118-06033-1

I. 开... II. ①何...②张...③王... III. 开关电源-电磁兼容性 IV. TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第189565号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 13½ 字数 240千字

2008年12月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价30.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

开关电源自 20 世纪 90 年代问世以来,便显示出强大的生命力。作为一项极具发展前景和影响力的产品,越来越引起了国内外开关电源界的普遍关注。开关电源具有高效率、高集成度、高性价比,最小体积、最轻质量、最佳性能指标等特点,目前已成为开发中、小功率开关电源、精密开关电源及系统的优选电路。但与此同时,开关电源的高速开关脉冲易产生许多电磁兼容问题,由于开关电源的工作频率比较高(几十至几百千赫),是对电磁兼容比较敏感的产品,它是一个高频干扰源向周围空间辐射骚扰、开关电源对同一电网中其他用电设备的高频传导干扰等电磁兼容方面的问题都成了人们关注的热点,也成了阻碍开关电源进一步推广发展的绊脚石。

电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)作为一门新兴的综合性交叉学科正在我国迅速发展,它涉及到电子、计算机、通信、航空航天、铁路交通、电力、军事以及人民生活的各个方面。随着科学技术的进步,电磁环境日趋复杂,电磁干扰及电磁防护问题日益突出。世界各发达国家均对此予以高度重视,我国的相关部门与机构也积极开展电磁兼容性的理论和应用研究。国家 3C 认证(中国强制性产品认证,China Compulsory Certification)制度的实施,鉴于开关电源的重要性的特殊性,国家质量监督检验检疫总局已将开关电源列为我国首批实行进出口电磁兼容强制监督管理的六种产品之一。

当前,图书市场中介绍开关电源设计的书籍很多,分别从开关电源的基本线路、开关电源的集成电路控制芯片、开关电源的有源滤波技术、有源功率因数控制技术、软开关技术等,对各种开关电源的设计做了详细的叙述,这为开关电源技术在我国普及和发展起到了推动的作用,但在国内专门从电磁兼容性方面研究开关电源的专著很少。本书是天津市社会发展重点基金(05YFSYSF033)、天津市自然科学基金(05YFJMJC13100)、天津理工大学专著出版资金资助项目。全书共分 8 章:第 1 章阐述了国内外开关电源的发展动态、开关电源的分类和主要技术指标;第 2 章给出了电磁兼容的基本概念和原理并用周期性函数的傅里

叶变换和非周期性干扰信号的频谱分析对电磁干扰(骚扰)进行数学描述;第3章对干扰耦合机理进行了详细的分析,分别是传导耦合、高频耦合和辐射耦合;第4章讨论了开关电源强制性产品认证中的电磁兼容问题及适用于开关电源电磁兼容性的有关标准;第5章详细阐述开关电源电磁兼容性测试技术,重点介绍了传导骚扰测试、辐射骚扰测试和功率吸收钳测试技术;第6章给出了开关电源电磁兼容性设计,通过对开关电源产生噪声机理的分析,给出开关电源电磁干扰的抑制措施,并使用谐波平衡有限元法分析高频开关电源;第7章讨论了开关电源印制电路板 PCB 的电磁兼容设计;第8章介绍了开关电源的最优化和可靠性设计方法。

特别感谢天津市科委、天津市计量监督检测科学研究院、天津市电磁兼容检测中心、天津理工大学给予出版的资助。

本书是在著者多年教学和科研积累之上完成的。本书由何宏教授、魏克新教授、王红君副教授、李丽博士、韩芳芳博士著,全书由何宏教授统稿审定。天津理工大学硕士研究生何颖、刘皓、武艺、刘芳、张志宏为本书的绘图做了大量的工作,在此一并向他们表示衷心感谢。

全书对开关电源的电磁兼容性进行了详细阐述,讨论的问题来龙去脉清晰、图文并茂,内容丰富、翔实,适合电气与电子工程、信息和计算机技术、生物医学工程、自动控制与机电一体化、仪器和测试技术等专业师生教学参考,还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修工程技术人员使用。

由于开关电源技术发展迅猛,电磁兼容的内容涉及到的技术领域和服务对象范围非常广,加上作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请各位读者和专家批评指正。

著者

于天津理工大学

2009年1月

目 录

第 1 章 开关电源发展概况	1
1.1 开关电源的发展概况.....	1
1.1.1 国内开关电源的发展概况	2
1.1.2 国外开关电源的发展概况	3
1.2 开关电源的分类	10
1.3 开关电源主要技术指标	11
第 2 章 电磁兼容技术概述	14
2.1 电磁兼容概述	14
2.1.1 电磁兼容的含义.....	14
2.1.2 电磁干扰的三要素.....	15
2.1.3 电磁干扰(骚扰)源的分类	16
2.1.4 电磁干扰(骚扰)源的时、空、频谱特性	18
2.1.5 电磁兼容性分析与设计方法.....	20
2.1.6 电磁兼容性研究的基本内容.....	22
2.2 电磁兼容技术术语	22
2.2.1 一般术语.....	23
2.2.2 干扰术语.....	24
2.2.3 发射术语.....	26
2.2.4 电磁兼容性能术语.....	27
2.3 电磁干扰(骚扰)的数学描述方法	29
2.3.1 周期性函数的傅里叶变换.....	30
2.3.2 非周期性干扰信号的频谱分析.....	30
2.3.3 脉冲信号的傅里叶积分.....	32
2.3.4 脉冲信号的快速时频域转换.....	34

第3章 干扰耦合机理	37
3.1 传导耦合	37
3.1.1 电容性耦合	38
3.1.2 电感性耦合	45
3.1.3 电容性耦合与电感性耦合的综合考虑	51
3.2 高频耦合	54
3.2.1 分布参数电路的基本理论	55
3.2.2 高频线间的耦合	57
3.2.3 低频情况的耦合	60
3.3 辐射耦合	61
3.3.1 电磁辐射	62
3.3.2 近场区与远场区的特性	66
3.3.3 电磁波的极化	71
3.3.4 辐射耦合	72
第4章 开关电源电磁兼容性的有关标准	73
4.1 开关电源强制性产品认证中的电磁兼容问题	73
4.2 适用于开关电源电磁兼容性的有关标准	77
第5章 开关电源电磁兼容性测试	82
5.1 传导骚扰测试	82
5.1.1 测量接收机	83
5.1.2 人工电源网络	90
5.1.3 试验方法	91
5.2 辐射骚扰测试	92
5.2.1 开阔试验场	92
5.2.2 电波暗室	93
5.2.3 必要的试验设施	98
5.2.4 试验方法	104
5.3 用吸收钳法测试辐射功率发射	106
5.3.1 试验方法的提出	106
5.3.2 功率吸收钳	106
5.3.3 测试线路	107

5.3.4	对用吸收钳法测试辐射骚扰发射的说明	108
5.4	电源谐波电流发射	109
5.4.1	测试电路	109
5.4.2	测试方法	110
5.5	电压波动和闪烁的测试	111
5.5.1	电压波动测试	111
5.5.2	闪烁测试	111
第6章	开关电源的电磁兼容性设计	114
6.1	开关电源的噪声	114
6.1.1	开关电源噪声的产生	114
6.1.2	干扰途径与耦合机制	118
6.2	开关电源的电磁干扰的抑制	119
6.2.1	开关电源 EMI 滤波器的设计	120
6.2.2	开关电源电磁脉冲(EMP)的设计	123
6.3	开关电源变压器中的谐波分析	124
6.3.1	应用于磁路的谐波平衡分析的概念	124
6.3.2	由电流源产生的磁场的谐波平衡有限元法	124
第7章	开关电源印制电路板的电磁兼容设计	130
7.1	有源器件敏感度特性和发射特性	131
7.1.1	电磁敏感度特性	131
7.1.2	电磁骚扰发射特性	132
7.1.3	ΔI 噪声电流和瞬态负载电流	133
7.2	线路板上的电磁骚扰辐射	137
7.3	单、双和多层板的 PCB 设计	143
7.3.1	单面印制电路板(PCB)的设计	143
7.3.2	双面印制电路板(PCB)的设计	149
7.3.3	单面板和双面板几种地线的分析	151
7.3.4	多层印制电路板(PCB)的设计	157
7.4	印制电路板设计中应注意的问题	166
第8章	开关电源的最优化及可靠性设计	170
8.1	开关电源的最优化设计	170

8.1.1	开关电源可行设计和最优化设计	170
8.1.2	开关电源工程最优化的基本内容	172
8.1.3	开关电源应用最优化方法的几个问题	176
8.2	开关电源的可靠性设计	179
8.2.1	可靠性定义	179
8.2.2	提高系统可靠性的途径	183
8.2.3	开关电源电气可靠性设计	190
附录	机内开关电源的认证试验项目一览表	194
参考文献	196

第 1 章 开关电源发展概况

1.1 开关电源的发展概况

传统的晶体管串联调整稳压电源是连续控制的线性稳压电源。这种传统稳压电源技术比较成熟,并且已有大量集成化的线性稳压电源模块,具有稳定性能好、输出纹波电压小、使用可靠等优点。但通常都需要体积大且笨重的工频变压器与体积和质量都很大的滤波器。由于调整管工作在线性放大状态,为了保证输出电压稳定,其集电极与发射极之间必须承受较大的电压差,导致调整管功耗较大,电源效率很低,一般只有 45% 左右。另外,由于调整管上消耗较大的功率,所以需要采用大功率调整管并装有体积很大的散热器,很难满足现代电子设备发展的要求。

随着计算机、电子技术的高速发展,20 世纪 80 年代,计算机全面实现了开关电源化,率先完成计算机的电源换代。20 世纪 90 年代,开关电源在电子、电气设备、家电领域得到了广泛的应用,开关电源技术进入了快速发展时期。

开关型稳压电源采用功率半导体器件作为开关,通过控制开关的占空比,调整输出电压。以功率晶体管(GTR)为例,当开关管饱和导通时,集电极和发射极两端的压降接近零;当开关管截止时,其集电极电流为零。所以其功耗小,效率可高达 70% ~ 95%。

开关型稳压电源直接对电网电压进行整流、滤波、调整,然后由开关调整管进行稳压,不需要电源变压器。由于功耗小,散热器随之减小,机内温升低,提高了整机的稳定性和可靠性。而且它对电网的适应能力也有较大的提高,一般串联稳压电源允许电网波动范围为 $220V(1 \pm 10\%)$,而开关型稳压电源在电网电压为 $110V \sim 260V$ 范围内变化时,都可获得稳定的输出电压。此外,开关工作频率为几十千赫,滤波电容器、电感器数值较小,因此开关电源具有质量轻、体积小等优点。

21 世纪,市场上开关电源中功率管多采用双极型晶体管,开关频率可达几十千赫;采用 MOSFET 的开关电源转换频率可达几百千赫。为提高开关频率,必须采用高速开关器件。对于兆赫以上开关频率的电源可利用谐振电路,这种

工作方式称为谐振开关方式。它可以极大地提高开关速度,理论上开关损耗为零,噪声也很小,这是提高开关电源工作频率的一种方式。采用谐振开关方式的兆赫级变换器已经实用化。

开关电源的发展离不开半导体器件及磁性元件的发展。高频化的实现,需要相应的高速半导体器件和性能优良的高频电磁元件。发展功率 MOSFET、IGBT 等新型高速器件,开发高频用的低损磁性材料,改进磁元件的结构及设计方法,提高滤波电容的介电常数及降低其等效串联电阻等,对于开关电源小型化始终产生着巨大的推动作用。

总之,在开关电源技术领域里,边研究低损耗回路技术,边开发新型元器件,两者相互促进,并推动着开关电源以每年超过两位数的增长率向小型、薄型、高频、低噪声以及高可靠性方向发展。

1.1.1 国内开关电源的发展概况

1. 电源技术的发展

国内开关电源技术的发展,在 20 世纪 70 年代末和 80 年代初,一些高等院校和科研院所引进的开关电源技术停留在试验开发和教学阶段。在 20 世纪 80 年代中期开关电源产品开始推广和应用。20 世纪 80 年代开关电源的特点是采用 20kHz,脉宽调制 (PWM) 技术,效率可达 65% ~ 70%。21 世纪我国通信、信息、家电和国防等领域的电源普遍采用高频开关电源,相控电源将逐渐被淘汰。

经过 20 多年的不断发展,开关电源技术有了重大进步和突破。新型功率器件的开发促进了开关电源的高频化,功率 MOSFET 和 IGBT 可使中小型开关电源工作频率达到 400kHz,(AC/DC) 或 1MHz(DC/DC);软开关技术使高频开关电源的实现有了可能,它不仅可以减少电源的体积和质量,而且提高了电源的效率,国产 6kW 通信开关电源,采用软开关技术,效率可达 93%;控制技术的发展以及专用控制芯片的生产,不仅使电源电路大幅度简化,而且使开关电源的动态性能和可靠性大大提高;有源功率因数校正技术(APFC)的开发,提高了 AC/DC 开关电源的功率因数,既治理了电网的谐波污染,又提高了开关电源的整体效率。

在开关电源的所有应用领域内,通信电源是增长速度最快的一部分。新型磁材料和新型变压器的开发,新型电容器和 EMI 滤波器技术的进步,以及专用集成控制芯片的研制成功,使开关电源实现了小型化,并提高了 EMC 性能。微处理器监控技术的应用,提高了电源的可靠性,也适应了市场对其智能化的要求。

新型半导体器件的发展是开关电源技术进步的龙头。目前正在研究高性能

的碳化硅半导体器件,一旦开发成功,对电源技术的影响将是革命性的。此外,平面变压器、压电变压器及新型电容器等元器件的发展,也将对电源技术的发展起到重要作用。

另外,集成化是开关电源的一个重要发展方向。通过控制电路的集成、驱动电路的集成以及保护电路的集成,最后达到整机的集成化生产。集成化和模块化减少了外部连线和焊接,提高了设备的可靠性,缩小了电源的体积,减轻了质量。目前,DC/DC 开关电源的功率密度可达到 $120\text{W}/\text{in}^3$ ($1\text{in} = 25.4\text{mm}$)。

总之,高效率、小型化、集成化、智能化以及高可靠性是大势所趋,也是今后的主要发展方向。

2. 电源生产、市场的发展

在开关电源领域,民族产业一直占有举足轻重的地位。在开关电源应用的起步阶段,很多生产厂家采取的都是小作坊式的生产模式。经过 20 余年的不懈努力,逐步向大规模生产转化,产品也从单一品种走向系列化。现在,我国已形成一批上亿元、甚至 10 亿元以上产值的电源企业,有些产品已进入国际市场。

我国信息产业、国防工业、家电行业,特别是电信业的迅猛发展,是电源市场发展的强大推动力。据国家统计局最新资料显示,当前我国电子信息产业的产区、产出、销售总规模以及对经济增长的贡献,均居全国各工业行业之首,成为我国工业第一支柱产业。

由于开关电源巨大的市场需求,孕育了大批的电源生产企业。成规模的企业有十几家,分为三种类型:第一类是自主研发开发,已生产出具有先进水平的系列电源产品,不仅可以满足各种电子设备的需要,而且在航空、铁路、电力、国防及家电等领域中得到了广泛应用;第二类是中外合资企业,采用国外较为先进的技术,在国内用户中有较高的信誉度;第三类是进口部件在国内组装,然后直接销售到国外市场,这些产品质量好,但成本也高,对国内市场的适应能力较差。

每年几十亿元的电源市场孕育了几百家开关电源生产企业,而且已有大量的国外产品和公司进入国内,今后的竞争将是技术的竞争、质量的竞争和服务的竞争,品牌效应越来越突出。市场的竞争和发展必将促使产业内部的分化和重组,实现大企业的产品互动和整合营销,而适应不了市场竞争的企业将被淘汰。

1.1.2 国外开关电源的发展概况

自 20 世纪 90 年代以来,许多新的领域和新的要求对开关电源提出了更新更高的挑战。如果从一个开关电源的输入和输出窗口观察可以发现,输入的要求变得更严了,不符合 IEC1000-3-2 标准的产品将陆续被淘汰;输出则派生出

了许多特殊的应用领域,研制和开发的难度变得更大了。正是由于外界的这些要求推动了两个开关电源的分支技术一直成为当今电力电子的研究课题,即有源功率因数校正技术和低压大电流高功率 DC/DC 变换技术。另外由于技术性能和要求的提高,使得许多相关技术课题的研究,例如 EMI 技术、PCB LayOut 问题、热理论的分析、集成磁技术、新型电容技术、新型功率器件技术、新型控制以及结构和工艺等正在迅速增加。

1. 开关电源电路器件的发展动态

1) 半导体器件的发展

功率半导体器件仍然是电力电子技术发展的龙头,电力电子技术的进步必须依靠不断推出的新型电力电子器件。

功率场效应管(MOSFET)由于采用单极性多子导电,使开关时间显著地减小,又因其很容易达到 1MHz 的开关工作频率而受到世人瞩目。但是 MOSFET 提高器件阻断电压必须加宽器件的漂移区,结果使器件内阻迅速增大,通态压降增高,通态损耗增大,所以只能应用于中小功率产品。为了降低通态电阻,美国 IR 公司采用提高单位面积内的原胞个数的方法。如 IR 公司开发的一种 HEXFET 场效应管,其沟槽(trench)原胞密度已达每平方英寸(1 平方英寸 = 6.4516 平方厘米)1.12 亿个的世界最高水平,通态电阻可达 $3\text{m}\Omega$ 。自 1996 年以来,HEXFET 通态电阻以每年 50% 的速度下降。IR 公司还开发了一种低栅极电荷(QG)的 HEXFET,使开关速度更快,同时兼顾通态电阻和栅极电荷两者同时降低,则 $R \times QG$ 的下降率为每年 30%。对于肖特基二极管的开发,最近利用 trench 结构,有望出现压降更小的肖特基二极管,它被称作 TMBS 沟槽 MOS 势垒肖特基二极管,有可能在极低电源电压应用中与同步整流的 MOSFET 竞争。

作为半导体器件材料的硅应用在半导体器件中已有 50 余年,硅性能潜力的进一步挖掘是很难的。有关半导体器件材料的研究从 20 世纪 70 年代,特别是 20 世纪八九十年代以来,砷化镓(GaAs)、半导体金刚石、碳化硅(SiC)的研究始终在进行。进入 20 世纪 90 年代以后,对碳化硅的研究达到了热点。实验表明,应用 SiC 的半导体器件的导通电阻仅为硅器件的 1/200。如电压较高的硅功率 MOSFET 导通压降达 3V~4V,而 SiC 功率 MOSFET 导通压降小于 1V,关断时间小于 10ns。实验表明,电压达 300V 的 SiC 肖特基二极管(另一电极用金、钼、钛、钴均可)的反向漏电流小于 0.1mA/mm,而反向恢复时间几乎为零。

相当一段时间曾认为砷化镓很有希望取代硅半导体材料。现在实验表明,碳化硅材料性能更优越。SiC 的研究滞后于 GaAs,主要原因是 SiC 晶体的制造难度太大。当温度大于 2000℃时, SiC 尚未熔化,但到了 2400℃时 SiC 已升华

变成气体了。现在是利用升华法直接从气体状态生长晶体。目前的问题是要进一步改善 SiC 表面与金属的接触特性和进一步完善 SiC 的制造工艺, 这些问题预计在 5 年 ~ 10 年内可得到解决。当应用 SiC 制造的半导体器件得到广泛应用时, 对电力电子技术的影响将会是革命性的。

2) 新型变压器的发展

新型变压器是电力电子产品或开关电源中必不可少的部件。平面变压器是近两年才面世的一种全新产品, 与常规变压器不同, 平面变压器没有铜导线, 代之以单层或多层印制电路板, 因而厚度远低于常规变压器, 能够直接制作在印制电路板上。其突出优点是能量密度高, 因而体积大大缩小, 相当于常规变压器的 20%; 效率高, 通常为 97% ~ 99%; 工作频率高, 从 50kHz 到 2MHz; 漏感低 (小于 0.2%); 电磁干扰小 (EMI) 等。

新型压电变压器是应用电能 - 机械能 - 电能的一种新型变压器, 是利用压电陶瓷电致伸缩的正向和反向特性而制成的。两片压电陶瓷紧密、牢固地结合在一起, 将原边交变电压加在一片压电陶瓷的水平曲线上, 这片压电陶瓷将产生垂直方向的机械振动而使另一片牢固结合的压电陶瓷跟着一起作垂直振动, 此时将在其水平轴线方向上产生电压——次级输出电压。目前, 这种新型变压器功率还不大, 适用于电压较高且电流较小的应用场合, 如照明灯具的启辉装置。

3) 超容电容器的发展

超容电容器是电容器件近年来的最新产品。美国的麦克韦尔公司一直保持着超容电容器技术的世界领先地位。超容电容器采用了独特的金属/碳电极技术和先进的非水电解质, 具有极大的电极表面和极小的相对距离。现在已开发、生产出多种具有广泛适用范围的超容电容器单元和组件, 单元容量小到 10F, 大到 2700F。超容电容器可方便地串联组合成高压组件或并联组合成高能量存储组件。超容电容器组件现已可提供 650V 的高压。

2. 电路集成和系统集成及封装工艺的发展动态

开关电源的发展方向是模块化、集成化和智能化。近几年来具有各种控制功能的专用芯片发展很迅速, 如功率因数校正 (PFC) 电路用的控制芯片, 软开关控制用的 ZVS、ZCS 芯片, 移相全桥用的控制芯片, ZVT、ZCT、PWM 专用控制芯片, 并联均流控制芯片以及电流反馈控制芯片等。功率半导体器件则有功率集成电路 (Power IC) 和 IPM。IPM 以 IGBT 作为功率开关, 将控制、驱动、保护、检测电路一起封装在一个模块内。由于外部接线、焊点减少, 可靠性显著提高。集成化、模块化使电源产品体积更小、可靠性更高, 给应用带来极大方便。

电路集成的进一步发展方向是系统集成, 如现在的逆变器是将 200 个 ~ 300 个零件装配在一起成为一个系统。这种做法要花很多时间和人力, 成本也高, 难

于做得体积很小。美国 VICOR 公司生产的第一代电源模块受生产技术、功率、磁元件体积以及封装技术的限制,功率密度始终未能超过 $80\text{W}/\text{in}^3$ 。近年来推出的第二代电源模块,内部结构改为模块式,达到高度集成化和全面电脑化,功率密度已经达到了 $120\text{W}/\text{in}^3$ 。电源模块内含元件只有第一代产品的 $1/3$,由 115 个减为 35 个。

第二代电源模块的控制电路只含两个元件,被称作“大脑”(brain)。“大脑”是两片厚膜电路,由 VICOR 公司自行开发生产,其总体积只有 0.18n^3 ,取代了第一代产品中的约 100 个控制元件,体积缩小了 60%。第二代产品的另一个突破是变压器的改良,采用屏蔽式结构和镀铜磁芯,把初级和次级线圈分置左右两边,温升很低,寄生电容和共模噪声也很低。变压器处理功率的密度达到了 $100\text{W}/\text{in}^3$,温升只有 3°C 。第二代产品功率器件的管芯直接焊接在基板上以取代第一代 TO-200 封装,可以提高散热效率,降低寄生电感、电容和热阻。

第二代产品的集成度显然提高了,但还不是系统集成。美国电力电子系统中心(Center of Power Electronics Systems, CPES)已经提出了系统集成的设想。信息传输、控制与功率半导体器件全部集成在一起,组成的元件之间不用导线连接以增加可靠性;采用三维空间热耗散的方法来改善散热,有可能将功率从低功率(几百瓦至上千瓦)做到高功率(几十千瓦以上)。系统集成的结果,可以改变现在的半自动化、半人工的组装工艺而达到完全自动化生产,因而可以降低成本,有利于推广。

英特尔的微处理器的发展趋势是速度更快,电压更低,而需要的电流容量一直在增加。20 世纪末英特尔微处理器的工作电压是 $2\text{V} \sim 3\text{V}$,电流为 10A ,操作频率是 300MHz 。而两年后它的工作电压降到 1V ,电流为 $30\text{A} \sim 50\text{A}$,操作频率为 1GHz 。现在的做法是把开关电源紧靠在微处理器上,开关电源以很快的速度提供电流给微处理器,这样尚能满足现有微处理器的要求。但将来微处理器工作电压降低、电流增加、速度加快的时候,现有的解决方法将无法达到它的要求。为此,专家学者们提出的构想是将开关电源紧密结合在微处理器主机板下面。这样开关电源的大小必须与微处理器相当,而现在的开关电源要比微处理器大几十倍。如何减小体积?这又面临新的挑战。

3. 功率因数校正技术的发展动态

功率因数校正的概念起源于 20 世纪 80 年代,但被重视和推广则在 20 世纪 80 年代末期和 90 年代。欧洲和日本相继对开关电源装置的输入谐波要求制定了标准。目前有两个标准,即 IEC555-2 和 IEC1000-3-2。这使得研究 PFC 技术已成为电源界的热点。通常有两大类 PFC 技术:一类是无源 PFC 技术,另

一类是有源 PFC 技术。前者采用无源元件来改善输入功率因数,减小电流谐波,以满足标准要求。其特点是简单,但体积庞大、笨重,有些场合则无法满足要求;后者是用一个变换器串入整流滤波与 DC/DC 变换器之间,通过特殊的控制,首先强迫输入电流跟随输入电压,从而实现单位功率因数,其次反馈输出电压便随之稳定,从而使 DC/DC 变换器的输入实现预稳。这种方法的特点是控制复杂,但体积大大减小。另外,第二级的设计也易优化,进一步提高性能。

有源功率因数校正技术的目的在于改善开关电源的输入功率因数,减小输入电流谐波,以满足 IEC1000-3-2 标准。具体的实现方式很多,但主要的方法有两种。一种是在整流滤波和 DC/DC 功率级之间串入一个有源 PFC 作为前置级,用于提高功率因数和实现 DC/DC 级输入的预稳,这种方法称为两级 PFC 技术。用作 PFC 电路的功率级基本上是 Boost 变换器,两级 PFC 技术一般用于较大功率输出的应用场合。另一种办法是努力将 PFC 级与 DC/DC 功率级中的一些元器件共用,并实现统一的控制,通常共用的元器件是 MOSFET。目前,将这种方法称为单级 PFC 技术。实际上它不是纯单级 PFC,应当是单开关 PFC。这种技术由于控制简单,元器件少,因此小功率应用非常适合。但它的功率因数、谐波等指标与功率级效率、输入电压范围、负载范围等密切相关,因此设计和优化显得尤为重要。

4. 低压大电流 DC/DC 变换技术的发展动态

低压大电流高功率 DC/DC 变换技术,已从前些年的 3.3V 降至现在的 1.0V 左右,电流目前已可达到几十安至几百安。同时,电源的输出指标,如纹波、精度、效率、欠冲、过冲等技术指标也得到进一步提高。所有这些使得这一分支技术的研究在当今乃至今后一段时间内,都将成为电力电子界的热点。它的研究内容非常广泛,包括电路拓扑结构动态问题(尤其是负载的大信号动态问题)、同步整流技术、控制技术以及其他相关技术的研究,诸如布线、集成磁技术、包装技术、高频功率器件技术等。

超高速计算机和超大规模集成技术的迅速发展,对它们的供电电源提出了愈来愈高的要求。其中要求供电电压不断降低(这是提高速度的前提条件),供电电流日益增加,低压大电流 DC/DC 变换技术正面临着许多新的问题。

1) 无暂态要求的低压大电流 DC/DC 变换技术

这一类变换器是针对负载变化极其迅速的低压大电流 DC/DC 变换技术而言的,并非没有一点儿暂态要求,实现起来还是相对容易的。对这一类技术,主要总结各类拓扑结构、自驱动同步技术和一些集成磁技术。

低压大电流 DC/DC 变换技术的关键是寻找合适的拓扑结构,使变压器的副边波形能直接驱动代替二极管的同步整流 MOSFET,这样既能保持简单性,又能

实现高效率。在低压大电流输出的电源中,副边整流环节的损耗占整个损耗的极大部分。最好的肖特基二极管也有 0.25V 正向压降,将产生巨大的导通损耗。所以,整流器件的唯一选择是用同步整流 MOSFET。副边的研究便主要集中在如何驱动这些同步整流 MOSFET 上。一种办法是采用外部控制电路,产生合适时序的驱动信号,去驱动这些同步整流 MOSFET,简称外驱动技术;另一种办法便是选择拓扑,直接用副边波形来驱动这些同步整流 MOSFET,简称自驱动技术。目前,与自驱动同步整流技术相匹配的拓扑结构只有两种:一种是有源钳位正激变换器;另一种是互补驱动半桥电路。

除了这两个拓扑结构外,三绕组钳位正激变换器、谐振钳位正激变换器等也是可以考虑的。只是在应用的时候,要考虑如何较简单地构成自驱动。构筑自驱动方式的好坏直接影响到控制的简单性、效率的高低以及电源的可靠性。

在低压大电流 DC/DC 变换器中,副边整流管的通态损耗尽管是最关键的一部分,但 Lay-out 损耗也不应忽视,尤其是大电流焊点处的损耗、印制板引线上的导电损耗等。如何减小焊点损耗,对于提高效率来说关系重大。倍流整流技术(current doubler)可将副边的中心抽头省掉,副边的匝数至少可以省一匝。另外,它还提供了变压器与电感集成于一个铁芯上的理论可能性,构成集成磁技术的低压大电流 DC/DC 变换器。目前,采用集成磁技术的 Current Doubler,其变压器和电感共用一个铁芯,副边绕组与电感绕组中的两个头共用,电感绕组的第三个头由一个外脚(outer leg)引出,构成的磁路很紧凑。全部原副边都可用印制板制作。由这种集成磁技术构成的低压大电流电源,具有很低的厚度和非常高的功率密度,是理想的新一代高功率密度电源产品。

2) 负载极其快速变化的低压大电流 DC/DC 变换技术

英特尔公司已准备推出新一代超高速奔腾计算机。为其芯片供电的电源目前称为 VRM(电压调节器模块),这是一个崭新的应用领域。其中最重要的要求是负载的变化速率(slew rate)。传统 VRM 的输出为 2.0V ~ 2.8V,电流为 13.0A, Slew Rate 是 30A/ μ s。下一代 VRM 的目标则是输出电压为 1.2V ~ 1.65V,电流为 70A, Slew Rate 是 150A/ μ s。面对极其快速的负载变化和非常低的输出电压,电源的动态欠调和超调已成为 VRM 中最为困难的一个问题。它不仅与开关频率有关,而且与印制电路板、引线电感、引线电阻、电容质量等密切相关。下面简要介绍 VRM 的研究情况和发展趋势。

由于 VRM 的输入电压仍然是一个可选项,因此目前的 VRM 研究有两种:一种是非隔离 VRM;另一种是隔离型 VRM。前者直接用计算机输出电源中的 5.0V 或者 3.3V 作为 VRM 的输出,采用 Buck 变换器来实现;后者则通常用 48.0V 或者 24.0V 作为输入电压,采用隔离变换器来实现。以下分别介绍这两种 VRM。