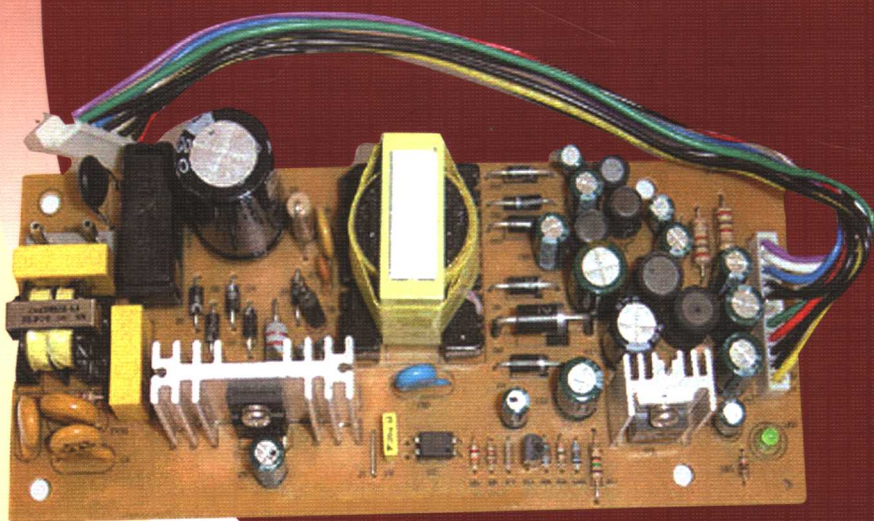


电 气 设 备 丛 书

# 开关电源技术

李金伴 李捷辉 李捷明 编著

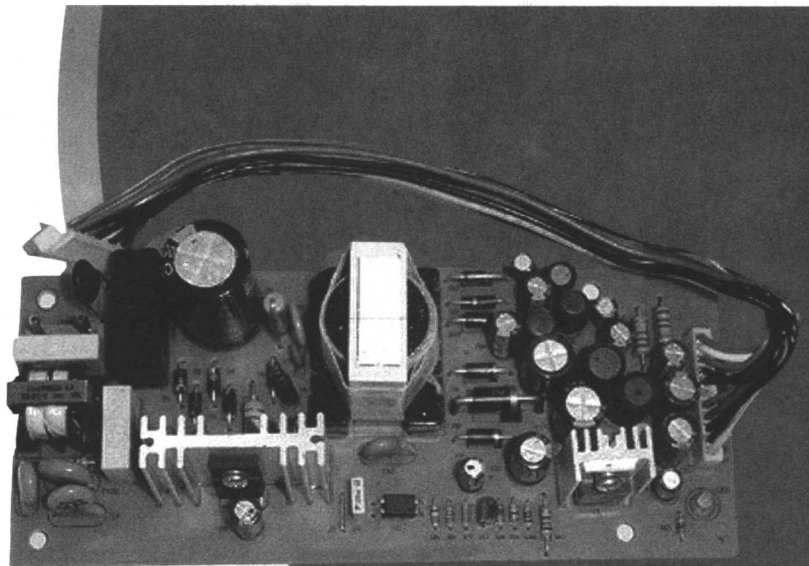


化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

电 气 设 备 丛 书

# 开关电源技术

● 李金伴 李捷辉 李捷明 编著



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

本书对开关电源技术做了较全面、系统的介绍,内容包括开关电源技术指标及性能;开关电源基础电路;高频开关电源系统、实用电路、主控元器件及电磁干扰抑制;新型电池电源技术;新型开关电源技术的计算机仿真和最优化设计。

本书内容丰富,紧密结合目前广泛应用的开关电源实用装置,实用性强,可供从事电源技术的研究、开发、应用人员以及从事通信工程的技术人员阅读参考,也可供大专院校师生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

开关电源技术/李金伴,李捷辉,李捷明编著. —北京:化学工业出版社,2006.5

(电气设备丛书)

ISBN 7-5025-8701-2

I. 开… II. ①李…②李…③李… III. 开关电源  
IV. TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第051823号

---

电气设备丛书

开关电源技术

李金伴 李捷辉 李捷明 编著

责任编辑:刘哲 周国庆

责任校对:王素芹

封面设计:于兵

\*

化学工业出版社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010) 64982530

(010) 64918013

购书传真:(010) 64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 405千字

2006年7月第1版 2006年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8701-2

定价:35.00元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 前 言

随着科学技术的迅猛发展，电气设备发展日新月异。尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展，使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化，传统的电气设备设计、制造技术不断吸收信息控制、材料、能源及管理等领域现代成果，综合应用于产品设计、制造、检测、生产管理和售后服务。在生产技术和生产模式等方面，许多新的思想和概念不断涌现，而且，不同学科之间相互渗透、交叉融合，衍生新的研究领域，迅速改变着传统电气设备制造业的面貌，产品更新换代极为频繁。21世纪电气设备发展的总趋势是：强弱电技术的融合更为密切；多学科、多专业的交叉更为深入；我国电气产品与国际接轨的步伐将迈得更大，国内外的技术交流也将更为广泛。

当今世界，科学技术发展迅速，知识经济发展显现端倪，综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争，归根结底是科技与人才的竞争。为了适应社会主义现代化建设的需要，我们组织编写了这套《电气设备丛书》（以下简称《丛书》），满足广大电气工作者和爱好者的迫切需要。

《丛书》编写时从实用出发，力求理论与实际相结合，突出新颖性，介绍电气设备的结构、工作原理、技术参数、适用场合、技术操作要点、运行与维护经验等，并注重理论联系实际，融入应用实例，突出技能和技巧。

《丛书》本着求精避繁的原则，对电气设备的基础理论、材料、器件、应用电路、安装、调试、运行与维修等适用面广、使用频率高和实用性强的技术内容做了详细的阐述。同时，还从实际出发，介绍反映电工电子、电力电子、计算机、自动控制、传感器技术、机电一体化的相互交叉、纵横结合的发展大趋势。

本套丛书共10个分册，包括：《防爆电器》、《防雷与接地装置》、《电气测量仪器》、《电热设备》、《开关电源技术》、《漏电保护器》、《高压电器》、《低压电器》、《变压器原理与应用》、《电机原理与应用》。

本书是《开关电源技术》。

开关电源装置是指对用户主机直接供电的装置，从广义上讲，它包括交流不间断供电和直流不间断供电两大部分，随着工农业生产的发展，以及通信网络的日益庞大，其在整个国民经济中的地位也变得越来越重要。作为各类控制系统的原动力——开关电源，其地位也日益提高。随着现代大型用电设备的迅速发展，特别是微电子技术的发展，任何通信设备都离不开电源，开关电源装置的质量直接影响通信的质量。通信设备对开关电源装置的要求越来越高，不断出现各种新型电源，如相控型稳压电源、集成化线性稳压电源、新型开关电源、不停电电源、太阳能电源和程控电源等。广大科技工作者迫切需要了解这些新型开关电源的原理、结构和使用。本书根据这些要求，介绍现代新型开关电源装置的理论 and 实用知识。

本书共10章，着重从工程实用的角度来阐述开关电源技术。第1章阐述了国内外开关电源的发展动态、开关电源的组成和主要性能要求、技术规范。第2章介绍了开关电源的功率变换电路、整流器分类、构成、负载均分技术、控制与驱动电路。第3章从工程实用的角度阐述了开关电源整流模块的类型、结构、性能参数和实用电路。第4章着重介绍开关电源

的监控原理、监控系统的硬件、软件构成和开关电源远程监控的实现。第5章从工程实用的角度阐述了高频开关电源的系统结构、工作原理、技术参数和实用电路。第6章介绍了电源装置环境集中监控与通信接口协议。第7章介绍了新型电池电源的类型、结构和工作原理。第8章介绍了电源配置、接地、防雷及各种保护措施。第9章着重介绍了开关电源的电磁兼容性(EMC)涉及的内容、噪声的产生与抑制 EMC 设计和 EMC 的各种标准。第10章简要地介绍了开关电源的计算机仿真和最优化设计方法。

本书内容新颖、深入浅出,系统全面地阐述了新型开关电源装置的基本原理和实用技术,紧密结合具体产品,因而具有较强的实用性、针对性。

本书第1、6章由李捷明编写,第2~5章由李金伴编写,第7~10章由李捷辉编写。在此对在本书编写过程中给予支持和帮助的同志,表示衷心的感谢。

由于开关电源技术发展迅猛,加之编者水平所限和时间仓促,书中的内容难免会有不足之处,敬请广大读者批评指正。

**编著者**  
**2006年2月**

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 国内外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 开关电源的基本构成及分类 .....	9
1.2.1 开关电源的基本构成 .....	9
1.2.2 开关电源的分类 .....	9
1.3 开关电源整流模块的电气性能要求 .....	10
1.4 开关电源主要技术指标 .....	14
<b>第 2 章 开关电源的基础电路</b> .....	17
2.1 开关电源整流器的基本构成原理与分类 .....	17
2.1.1 开关电源整流器的发展概况 .....	17
2.1.2 开关整流器的基本构成原理及特点 .....	17
2.1.3 开关整流器的基本分类 .....	18
2.2 开关电源的功率变换电路 .....	19
2.2.1 单端正激式变换电路 .....	19
2.2.2 单端反激式变换电路 .....	20
2.2.3 推挽式功率变换电路 .....	22
2.2.4 全桥式功率变换电路 .....	22
2.2.5 半桥式功率变换电路 .....	23
2.2.6 功率变换电路的比较与应用 .....	24
2.3 谐振型智能开关电源技术 .....	25
2.3.1 开关电源模块的技术参数分析 .....	25
2.3.2 谐振型开关电源技术 .....	25
2.3.3 谐振型开关电源的应用及发展趋势 .....	27
2.4 开关电源的控制和驱动电路 .....	27
2.4.1 控制电路 .....	27
2.4.2 驱动电路 .....	28
2.4.3 电流型 PWM 集成控制器 UC3842/3/4/5 的应用 .....	29
2.5 开关电源的功率因数校正器 .....	35
2.5.1 问题的提出 .....	35
2.5.2 功率因数校正器的工作原理 .....	35
2.5.3 选择高功率因数校正器的最佳拓扑 .....	39
2.5.4 有源功率因数校正器 UC3854 .....	40

2.6	开关电源的负载均分技术	42
2.6.1	负载均分的概念	42
2.6.2	脉宽调制 (PWM) 型负载均分电路	43
2.6.3	负载均流集成控制器 UC3902	43
<b>第3章</b>	<b>开关电源的整流模块</b>	<b>48</b>
3.1	概述	48
3.1.1	开关电源的整流模块	48
3.1.2	整流模块逆变开关电路的选择	50
3.1.3	整流模块功率变换方式的选择	52
3.2	DMA10 开关电源整流模块	53
3.2.1	DMA10 开关电源整流模块的特点和技术指标	53
3.2.2	DMA10 的基本原理及构成框图	54
3.2.3	DMA10 的显示、参数设置及均流	56
3.2.4	DMA10 的故障查找及维护	62
3.3	DMA12 开关整流模块	64
3.3.1	DMA12 的特点和技术指标	64
3.3.2	DMA12 的基本原理	65
3.4	DMA14 型高频开关整流模块系统	67
3.4.1	DMA14 型高频开关整流模块技术参数	67
3.4.2	DMA14 型高频开关整流模块结构	68
3.4.3	DMA14 型高频开关整流模块工作原理	70
3.4.4	DMA14 的操作与维护	74
<b>第4章</b>	<b>开关电源的监控系统</b>	<b>80</b>
4.1	开关电源的监控原理	80
4.1.1	开关电源监控系统的基本功能	80
4.1.2	开关电源系统监控内容	80
4.1.3	开关电源监控系统构成	81
4.1.4	开关电源系统的管理	83
4.2	DK04 系列智能开关电源监控模块	83
4.2.1	性能与特点	83
4.2.2	系统硬件构成及工作原理	85
4.2.3	软件系统	86
4.3	开关电源监控系统实例	86
4.3.1	JM-6A 型监控器	86
4.3.2	PSMS 动力设备及环境监控系统	87
<b>第5章</b>	<b>高频开关电源系统</b>	<b>90</b>
5.1	概述	90
5.1.1	开关电源系统发展概况	90
5.1.2	高频开关电源系统基本组成	90

5.1.3	开关电源系统性能指标	91
5.1.4	开关电源系统的电路技术	91
5.2	PS48600 型高频开关电源系统	92
5.2.1	系统结构	92
5.2.2	交直流配电系统	92
5.2.3	PS48600 电源整流系统	94
5.2.4	监控单元	95
5.3	谐振型开关稳压电源系统	96
5.3.1	SWICHTEC 谐振型开关稳压电源系统	96
5.3.2	DPC400 II 谐振型通信开关电源系统	101
5.4	KGB <sub>T</sub> A 系列 UPS 系统	102
5.4.1	概述	102
5.4.2	KGB <sub>T</sub> A 系列 UPS 主要性能和参数	104
5.4.3	KGB <sub>T</sub> A 系列 UPS 整流器	104
5.4.4	KGB <sub>T</sub> A 系列 UPS 电源逆变器	109
5.4.5	KGB <sub>T</sub> A 系列 UPS 交流静态开关	112
<b>第 6 章</b>	<b>电源装置环境集中监控与通信接口协议</b>	<b>116</b>
6.1	电源装置计算机集中监控系统	116
6.2	电源装置监控系统的组成与结构	117
6.3	开关电源监控系统串行通信的基本概念	118
6.4	开关电源监控系统通信接口	119
6.5	开关电源监控系统通信协议	121
<b>第 7 章</b>	<b>新型电源电池</b>	<b>122</b>
7.1	蓄电池的发展动态和分类	122
7.1.1	蓄电池的国内外发展动态	122
7.1.2	蓄电池在电源系统中的作用	123
7.1.3	蓄电池的分类	124
7.2	铅酸蓄电池的基本工作原理和应用	126
7.2.1	铅酸蓄电池基本工作原理	127
7.2.2	阀控式免维护铅酸蓄电池的结构与特性	129
7.2.3	铅酸蓄电池的运行方式与充电方法	133
7.3	镉-镍蓄电池 (Cd-Ni Battery)	138
7.3.1	镉-镍蓄电池的基本工作原理	138
7.3.2	密封镉-镍蓄电池工作原理和特性	139
7.4	金属氢化物-镍电池 (MH-Ni Battery)	141
7.4.1	金属氢化物镍电池的基本工作原理	141
7.4.2	密封金属氢化物镍电池的结构	142
7.4.3	金属氢化物镍电池的主要特性	142
7.4.4	MH-Ni、Cd-Ni 电池快速充电方法	143



7.5	锂离子电池 (Lithium-Ion Battery)	146
7.5.1	锂离子电池的工作原理和结构	146
7.5.2	锂离子电池充放电特性	147
7.5.3	锂离子电池中的安全措施	148
7.6	太阳能电池	149
7.6.1	概述	149
7.6.2	硅太阳能电池的结构和工作原理	150
7.6.3	硅太阳能电池的等效电路和伏-安特性	151
7.6.4	太阳能电池的种类	153
7.6.5	太阳能电池的组装方式	154
7.6.6	太阳能电池供电系统	155
7.6.7	太阳能通信电源的供电电路和控制电路	163
<b>第8章</b>	<b>电源装置的接地、防雷与防静电</b>	<b>167</b>
8.1	电源装置的接地	167
8.1.1	概述	167
8.1.2	克服地线干扰的主要方法	169
8.1.3	接地电位差干扰的抑制方法	171
8.1.4	安全接地	171
8.1.5	电源装置接地系统的设计	172
8.1.6	搭接	173
8.2	电源装置的防雷技术	174
8.2.1	雷电的形成过程	174
8.2.2	雷电破坏作用的机理	176
8.2.3	雷电电磁脉冲及其防护	177
8.3	电源装置的静电防护	181
8.3.1	静电的产生	181
8.3.2	静电的危害	182
8.3.3	静电的测量	183
8.3.4	静电放电的防护	184
8.4	计算机供电电源的接地保护	187
<b>第9章</b>	<b>新型开关电源的电磁兼容性</b>	<b>189</b>
9.1	概述	189
9.1.1	电磁兼容技术的发展动态	189
9.1.2	电磁干扰源的分类	189
9.2	新型开关电源电磁兼容性 (EMC) 涉及的内容	191
9.2.1	电磁干扰产生的形式	191
9.2.2	电磁敏感度 (EMS) 的测量	192
9.2.3	雷电产生的电磁脉冲 (EMP)	192
9.2.4	静电放电 (ESD) 的性能指标	192

9.3	新型开关电源的电磁兼容性的设计 .....	192
9.3.1	新型开关电源 EMI 滤波器的设计 .....	193
9.3.2	开关电源电磁脉冲 (EMP) 的设计 .....	194
9.3.3	新型开关电源系统电磁兼容的设计 .....	194
9.4	电磁辐射与传导噪声的测量方法 .....	196
9.4.1	概述 .....	196
9.4.2	传导噪声的测量方法 .....	196
9.4.3	辐射噪声的测量方法 .....	198
9.4.4	吸收钳位法 .....	199
9.5	新型开关电源对电磁干扰抑制所用的元器件 .....	200
9.5.1	对 EMI 抑制所用的元器件 .....	200
9.5.2	新型开关电源电磁干扰 (EMI) 抑制的滤波器 .....	203
9.6	新型开关电源电磁兼容性的有关标准 .....	209
9.6.1	新型开关电源 EMI 标准 .....	209
9.6.2	电磁脉冲 EMP 标准 .....	209
9.6.3	信息技术设备的电磁兼容性标准 .....	209
9.6.4	国际电磁兼容通用标准简介 .....	213
<b>第 10 章</b>	<b>新型开关电源仿真的方法 .....</b>	<b>218</b>
10.1	新型开关电源计算机仿真技术 .....	218
10.1.1	新型开关电源仿真方法 .....	218
10.1.2	新型开关电源电路的建模和仿真分析方法 .....	219
10.1.3	用于新型开关电源的 SPICE 和 IsSpice 仿真软件 .....	220
10.2	MATLAB 语言在新型开关电源仿真中的应用 .....	221
10.2.1	MATLAB 语言简介 .....	221
10.2.2	MATLAB 语言的使用方法 .....	222
10.2.3	电力电子器件的 MATLAB/SIMULINK 仿真模型 .....	223
10.2.4	MATLAB 在开关电源仿真中的应用 .....	227
10.3	IsSpice 及其在开关电源仿真中的应用 .....	230
10.3.1	IsSpice 仿真软件的组成及功能特点 .....	231
10.3.2	开关电源的基本变换器仿真示例 .....	232
10.4	新型开关电源的最优化设计方法 .....	235
10.5	开关电源工程最优化的基本内容 .....	236
10.6	开关电源应用最优化方法的几个问题 .....	239
<b>参考文献</b>	.....	<b>241</b>

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 国内外开关电源的发展概况

随着计算机、电子技术的高速发展,电子技术的应用领域越来越广泛,电子设备的种类也越来越多,电子设备与人们的工作、生活的关系日益密切。任何电子设备都离不开可靠的电源,它们对电源的要求也越来越高。电子设备的小型化和低成本化,使电源以轻、薄、小和高效率为发展方向。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重量都很大的滤波器。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。20世纪50年代,美国宇航局以小型化、重量轻为目标,为搭载火箭开发了开关电源。在近半个多世纪的发展过程中,开关电源因具有体积小、重量轻、效率高、发热量低、性能稳定等优点而逐渐取代传统技术制造的连续工作电源,并广泛应用于电子整机与设备中。

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%。而功耗小,散热器也随之减小。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。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,因此开关电源具有重量轻、体积小等优点。另外,由于功耗小,机内温升低,提高了整机的稳定性和可靠性。而且其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 $220\text{V}\pm 10\%$ ,而开关型稳压电源在电网电压为110~260V范围内变化时,都可获得稳定的输出电压。

开关电源的高频化是电源技术创新技术,高频化带来的效益是使开关电源装置空前地小型化,并使开关电源进入更广泛的领域,特别是在高新技术领域的应用,推动了高新技术产品的小型化、轻便化,另外开关电源的发展与应用在节约资源及保护环境方面都具有深远的意义。

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MOS-FET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。21世纪开关电源的技术追求和发展趋势可以概括为以下四个方面。

① 小型化、薄型化、轻量化、高频化。开关电源的体积、重量主要是由储能元件(磁性元件和电容)决定的,因此开关电源的小型化,实质上就是尽可能减小其中储能元件的体积。在一定范围内,开关频率的提高,不仅能有效地减小电容、电感及变压器的尺寸,而且还能够抑制干扰,改善系统的动态性能,因此,高频化是开关电源的主要发展方向。

② 高可靠性。开关电源使用的元器件比连续工作电源少数十倍,因此提高了可靠性。从寿命角度出发,电解电容、光耦合器及排风扇等器件的寿命决定着电源的寿命。所以,要从设计方面着眼,尽可能使用较少的器件,提高集成度,这样不但解决了电路复杂、可靠性差的问题,也增加了保护等功能,简化了电路,提高了平均无故障时间。

③ 低噪声。开关电源的缺点之一是噪声大。单纯地追求高频化,噪声也会随之增大。采用部分谐振转换回路技术,在原理上既可以提高频率又可以降低噪声,所以,尽可能地降低噪声影响是开关电源的又一发展方向。

④ 采用计算机辅助设计和控制。采用CAA和CDD技术设计最新变换拓扑和最佳参数,使开关电源具有最简结构和最佳工况。在电路中引入微机检测和控制,可构成多功能监控系统,可以实时检测、记录并自动报警等。

开关电源的发展从来都是与半导体器件及磁性元件等的发展休戚相关的。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MOS-FET、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 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。国内开关电源技术的发展,基本上起源于20世纪70年代末和80年代初。当时引进的开关电源技术在高等院校和一些科研院所停留在试验开发和教学阶段。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%。

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重量,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,减轻了重量。目前,DC/DC开关电源的功率密度可达到 $120\text{W}/\text{in}^3$ ①。

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。

(3) 电源市场的发展 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、销售总规模以及对国家经济增长的贡献,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,孕育了大批电源的生产企业。成规模的企业有十几家,分为三种类型:第一类是自主研制开发,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。

(4) 电源标准的制定 20世纪90年代初,高频开关电源的应用刚刚在电子、电信行业起步,适时颁布的《通信用高频开关整流器》和《通信局(站)电源系统总技术要求》等标准对指导生产、服务用户起到了重要作用,对高频开关电源在电信行业的迅速推广也起到了积极作用。随着市场的扩大,用户对电源智能化程度的要求越来越高,有关电源集中监控的标准相继被推出。随着技术不断进步,经验逐渐积累,行业标准急需修订,技术指标需要改进,测试方法需要完善,内容需要增加(例如动态响应、电磁兼容等),为把好产品质量关提供更可靠的依据。

### 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

①  $1\text{in}=25.4\text{mm}$

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(MOS-FET)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MOS-FET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1.12亿个的世界最高水平,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MOS-FET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80~90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Si器件的1/200。如电压较高的硅功率MOS-FET导通压降达3~4V,而SiC功率MOS-FET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的研究所以滞后于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5~10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刷电路板,因而厚度远低于常规变压器,能够直接制作在印刷电路板上。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小,适用于电压较高而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200~300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VI-COR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 $0.1\text{in}^3$ ,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 $3^\circ\text{C}$ 。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2~3V,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30~50A,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,李泽元教授提出要彻底解决问题,必须将开关电源与微处理器结合在一起。今天英特尔公司大部分人接受了这一想法并在积极促成此事。提出的构想是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,第一强迫输入电流跟随输入电压,从而实现单位功率因数,第二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。

① 两级 PFC 技术的现状和发展动态。目前,所研究的两级 PFC 技术,一般都是指 Boost PFC 前置级和后随的 DC/DC 功率变换级。对第一级 Boost PFC 而言,研究的热点主要有两个:一是功率级的进一步完善;另一个是 PFC 的控制简化。前一个问题是因为在 Boost 电路中输出比输入高,因而保持最低的中间母线电压也必须大于最高输入电压的峰值,这由电网电压的范围决定。在我国,如果仅考虑单相电网输入,最高电压为 270V,则该母线电压就须设置在 385~400V 左右。高压输出对 MOSFET 的开通损耗和二极管的反向恢复损耗而言,在 PWM 硬开关工作状态下都会相当大。因此,一个最大的问题就是如何减小或者消除这两个损耗,相应就有许多软开关 Boost 变换器理论的研究。现在具代表性的有两种技术:一种是有源吸收技术;另一种是无源吸收技术。

有源吸收技术是采用附加的一些有源开关,例如辅助 MOSFET、无源 L.C.、二极管元器件,通过控制开关的时序,使得 Boost 变换器电路中的主开关和主二极管实现 ZVS 和 ZCS。许多相应的 Boost 变换器电路已经被发明,如 ZVT、ZCT Boost 变换器、有源钳位 Boost 变换器、ZVZCS-Boost 变换器等。有源吸收技术虽然能较好地解决主开关的软开关问题,但辅助开关自身往往仍是硬开关,仍会产生很大的功率损耗。再加上复杂的时序控制,使得变换器的成本增加,可靠性降低,在实际的产品设计中并不经常采用这种技术。

无源吸收技术则是采用无损元件 L.C. 和二极管组成的网络,来延缓 MOSFET 的  $dV/dt$  和二极管的  $di/dt$ ,从而减小开通损耗和反向恢复损耗。这类吸收技术最近又获得新的发展,原因是它的成本较为低廉,不需要复杂的控制,可靠性较高。

除了 Boost PFC 功率级的软开关技术研究外,另一个较为关注的研究方向是 PFC 的控制技术。目前,最为常用的控制技术有三种,即工作模式 (CCM) 平均电流型控制 Boost PFC、CCM/DCM 边界控制 Boost PFC 和电流钳位 (current clamp) 控制 Boost PFC。

② 单级 PFC 技术的现状和趋势。早在 1990 年,美国科罗拉多大学的 Erickson 教授等人将前置级 Boost 电路和后随级 Flyback (反激) 变换器或者 Forward (正激) 变换器的 MOSFET 共用,提出所谓的单级 PFC 变换器。研究单级 PFC 技术的目的是减少元器件,节约成本,提高效率,简化控制等。与传统的两级电路比较,节省了一个 MOSFET,但增加了一个二极管。另外,其控制采用一般的 PWM 方式,故相当简单。为保证高输入功率因



数, 输入电感的电流应当为 DCM 方式。在这里, 控制器的作用是保证快速、稳定地输出, 对于输入功率因数则需功率级自身获得。功率因数和谐波电流的高低, 与电感  $L_{in}$  的大小和拓扑结构等密切相关, 这便是近五六年来研究单级 PFC 结构的真正动机。

研究单级 PFC 技术的前提条件是 IEC1000-3-2 标准只对各次电流谐波做了要求, 而对功率因数并没要求, 一个功率因数只有 0.70 左右的开关电源, 仍可满足各次电流谐波的要求。所以, 只要有改善的电流波形, 电源产品就有可能达到谐波标准。与真正的有源 PFC 技术不同, 它对功率因数仅做开环控制。事实上已不能称为 PFC, 但鉴于传统, 这里仍称单级 PFC 技术。单级 PFC 电路在实际电路中存在着一个非常严重的问题, 当负载变轻, 达到临界连续状态时, 由于输出能量迅速减少, 但控制占空比 (由负载决定) 没有变化, 输入能量维持不变, 使得此时  $P_{in} > P_o$ , 多余的输入能量将给中间储能电容充电,  $V_{cb}$  (电容器两端的电压) 增加, 占空比减少, 从而使  $P_{in}$  减少, 最终达到一个新的平衡态, 即  $P_{in} = P_o$ , 这一过程使中间储能电容电压到达一个很高值。在电路中, 对于 90~265V 的交流电网, 该电压会达到甚至超过 1000V。就目前的电容技术和功率器件技术而言, 这么高的电压都是不实际的, 因此无法使用。此后的单级 PFC 电路都在努力将  $V_{cbmax}$  降至 450V 以内, 以便可以利用现有的电容和功率器件。

单级 PFC 技术的研究仍然呈现上升的趋势, 原因是性能尚未最优, 许多问题有待进一步解决。例如中间储能电容电压可望降至 400V 以下, 分析与设计还存在许多问题, 还要与两级 PFC 技术做出比较。

(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, 整流器件的惟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: 一是有源钳位正激变换器; 二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