

通信开关电源技术的进展

蔡宣三*

(清华大学, 北京 100084)

摘要 简要回顾了20世纪通信开关电源技术的进展历程和取得的成就; 高功率密度、高效率、高性能、高可靠性仍然是今后开关电源的发展方向。提出了21世纪我国应注意开发的通信开关电源技术。

关键词 通信 开关电源 功率变换器

1 通信电源技术发展历程

我国自20世纪80年代起, 通信设备中6kW以下大功率AC/DC脉宽调制(PWM)开关电源(AC 400V或230V输入、DC 48V输出)代替相控整流器, 成为通信系统一次电源的主流产品, 通信工程界习惯称为开关整流器(SMR)。配置二次电源(48±5, ±12V DC-DC开关变换器模块)和铃流模块, 可满足负载要求。开关整流器与相控整流器比较, 在体积、重量和效率几方面更为优越。

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, 人们在降低开关整流器的重量方面做了不少工作。发展小型化轻型电源, 对便携式通信设备(如移动电话等)尤为重要。表1给出70~90年代50A/48V开关整流器轻量化历程。

表1 50A/48V开关整流器重量变化历程

年代	70	80	90
重量(kg)	55	38	10

为了实现高功率密度, 必须提高PWM开关电源工作频率。例如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。现在200~500kHz已成为100W输出DC-DC功率变换器的标准开关频率。图1给出60~90年代通信和计算机用开关电源高频化的历史发展进程。可见, 随

着工作频率的提高, 开关电源的单位功率体积(cm^3/W)也不断减小。

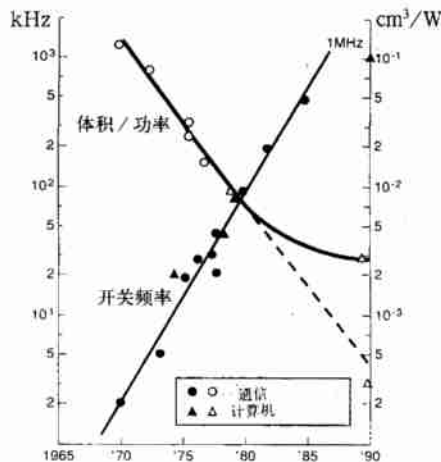


图1 开关电源高频化的历史发展进程

2 20世纪推动开关电源发展的主要技术

2.1 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如下所述。

(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。

*蔡宣三 男, 汉族, 上海人, 教授。

(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、1800 A; 功率 MOSFET, 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 MOSFET, 750V、15mA, $R_{on}=66m\Omega \cdot cm^2$; 晶闸管 950V、6A, 通态压降 3.67V。但是达到 SiC 器件的实用化要求, 还需要一定时间, 价格要进一步下降, 例如小于 100 美元/片。

(4) 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; 环境温度达 +125°C。

90年代, 随着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)。将功率器件与电路、控制、以及检测、执行等元件集成封装, 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。

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、重量, 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, 或称软开关技术(相对于 PWM 硬开关技术而言)。90年代中期, 30A/48V 开关整流器采用移相全桥 ZVS-PWM 技术后, 重 7kg。比用 PWM 技术的同类产品, 重量下降 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(48/12V)总效率可达到 96%; 48/5V DC-DC 开关电源模块的效率可达到 92%~93%。20 世纪末, 国内生产的通信用 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:“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, 有的开关变换器产品已达到这一目标。

2.3 控制技术

由于开关变换器的强非线性, 并具有离散和变结构的特点, 负载性质也是多变的, 并要求主电路性能满足负载大范围变化等特点, 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、神经网络控制以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)、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。

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。用有源功率因数校正技术(简称 APFC), 可将功率因素提高到 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。

2.5 高频磁元件

a. 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(见图 2)。绕组采用铜箔或板型印制电路, 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(portable)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} 均最小的绕组结构,并开发平面变压器的优化设计软件等。

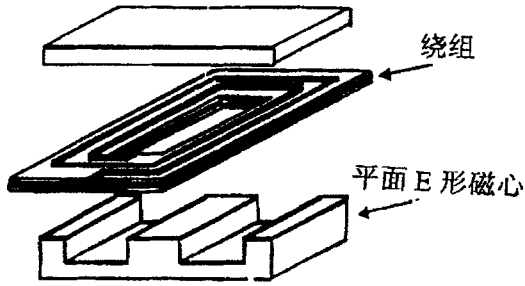


图2 平面变压器

据报道,国外已有多家公司开发了平面变压器。5W~20 kW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、十几种平面变压器。效率97~99%;工作频率50kHz~2MHz;漏感小于0.2%;EMI小。

b. 集成磁元件

将多个磁元件(如变压器和电感,多个电感)集成在一个磁心上(如图3),可以减少变换器体积,降低磁元件损耗。国外已有集成磁元件(Integrated Magnetics, IM)变换器:50W、5V及15V两路输出的正激IM变换器、100kHz,变压器和输出滤波电感集成在一个磁心上;再如,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0.21英寸,功率密度达150W/英寸³。

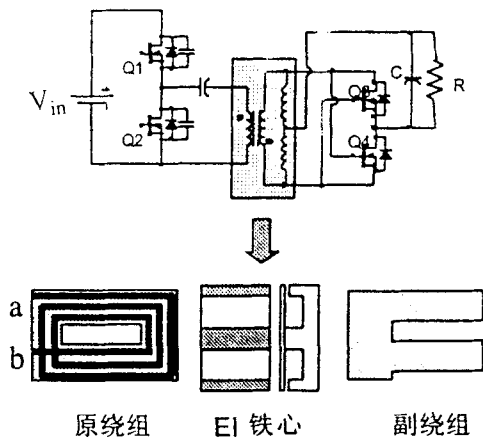


图3 集成磁元件

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。

c. 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(10mm²,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,可使高频磁元件磁密增高。加州大学Berkely分校微加工试验室已研制成10MHz变压器,开发了最优设计软件,变压器单位面积功率为20W/cm²,效率可达90%以上。

d. 压电式陶瓷变压器的应用

压电变压器(PET)的应用可使功率变换电路小型化,是20世纪90年代国际磁元件研究的热点之一。研究内容包括:压电式陶瓷材料的损耗评估、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在高频功率变换器中的应用已有报导,如:输出24 W,12V的2MHz DC-DC变换器(PET变比为5:1;输出2W、1200Vac的日光灯电源(PET变比为20:1;冷阴极荧光灯和霓虹灯逆变器。

2.6 饱和电感的应用

饱和和电感有两种:可控饱和电感和自饱和(self-saturable)电感,前者习惯称为磁放大器。

20世纪80年代,由于高频磁性材料,如非晶态软磁合金、超微晶软磁合金等的发展,使有可能在多路输出的高频(大于100 kHz)开关电源中,用高频可控饱和和电感作为其中一路输出(例如5V)的电压调节元件,主要输出(例如12V)仍用PWM控制(如图4);称为后置调节器(Post-regulator)或磁放大(magamp)调节器,但这里并未按放大器原理工作。因此似称为‘磁调节器’较合适。其优点是:电路简单、EMI小、可靠、高效,可较精确地调节输出电压。特别适合应用于输出电流为1安到几十安的开关电源。

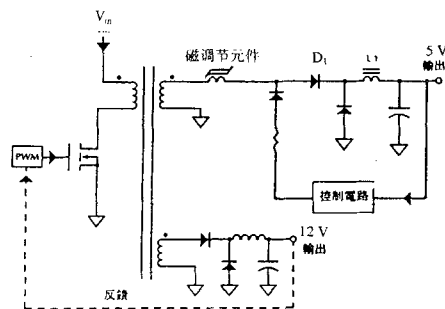
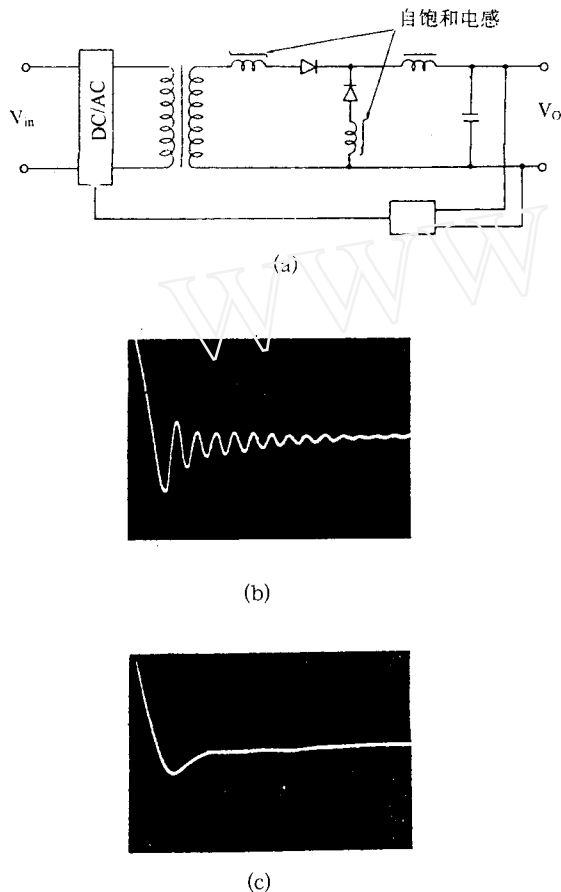


图4 正激开关电源5V输出磁调节器原理图

自饱和电感即带铁心(无空隙)的线圈,其特点是电感量随通过的电流大小自动变化,电流足够大时,铁心自动进入饱和。如果铁心磁特性是理想的(例如呈矩形),则自饱和电感,类似一个磁‘开关’。在开关电源中,应用自饱和电感和变压器副边输出整流管串联(如图5),可消除二次寄生振荡,减少循环能量,吸收浪涌、抑制尖峰、使整流管损耗减小。



(a) 电路示意图 (b)及(c) 二极管关断电压波形 (b)未接自饱和电感 (c)整流管串接自饱和电感

图5 用自饱和电感消除开关电源二次寄生振荡

此外,自饱和电感在移相全桥 ZVS-PWM 开关电源中的应用举例如下:

- a) 作为谐振电感,扩大轻载下满足 ZVS 条件的范围,并使其占空比损失最小;
- b) 在变压器原边串接电容,可实现混合 ZVZCS-PWM 控制。

2.7 低电压大电流输出DC-DC 变换器

数据处理系统的速度和效率日益提高,新一代微处理器的逻辑电压低至1.1~1.8V,而电流达50~100A,其供电电源——低电压、大电流输出DC-DC变换器模块,又称为电压调整器模块(Voltage Regulator Module, VRM)。新一代微处理器对VRM的要求是:输出电压很低、输出电流大、电流变化率高、快速响应等。

a) 为降低IC的电场强度和功耗,必须降低微处理器供电电压,因此VRM的输出电压要从传统的3V左右降低到小于2V,甚至1V。

b) 运行时,电源输入电流>100A,由于寄生LC参数,电压扰动大,应尽量减少L的影响。

c) 微处理器起停频繁,不断从休眠状态起动,工作,再进入休眠状态。因此要求VRM电流从0突变到50A,又突降到0,电流变化率达5A/ns。

d) 设计时应控制扰动电压≤10%,允许输出电压变化±2%。

线路的寄生阻抗、电容的ESR和ESL对VRM在负载变化过程中的电压调整影响很大,必需研制高频、高功率密度和快速的新颖VRM。现在已有多种拓朴问世,如:同步整流 Buck 变换器(用功率MOS管作为开关二极管);为防止电流大幅度变化时由于高频寄生参数引起输出电压扰动,采用增大输出滤波电容、电感的方法,但其缺点甚多;国外开发了用多输入通道(multi-channel),又称为‘多相’输入DC-DC变换器;并联输出用波形交错(Interleaving)方案,保证VRM输出纹波小,改善输出瞬态响应,并可减少输出滤波电感和电容(见表3)。

表3 减小VRM输出纹波的两方案比较

方案	C (μF)	L(μH)	瞬态电压跌落(mV)
仅增大电容、电感	7000	3.8	150
多输入通道、交错并联输出	1520	0.32 × 2	100

2.8 分布电源及并联均流技术

分布电源技术是通过250-425V/48VDC-DC变换器和48V母线电压,供电给负载板(Board),再通过板上(on board)若干个并联的薄型DC-DC变换器,将48V变换为负载所需的3~5V。一般,DC-DC变换器的功率密度达100W/英寸³、效率90%,并且应当是可并联的。分布电源系统适合于用超高速集成电路组成的大型

工作站(如图像处理站)、大型数字电子交换系统等,其优点是:可降低48V母线上的电流和电压降;容易实现N+1冗余,提高了系统可靠性;易于扩增负载容量;散热好;瞬态响应好;减少电解电容器数量;可实现DC-DC变换器组件模块化;易于使用插件连接;可在线(on line)更换失效模块等。

2.9 电源智能化技术

电子电源微处理器监控、电源系统内部通信、电源系统智能化等技术的应用,国内外均已较成熟。

以上简要回顾了20世纪通信电源发展的历程和取得的成就,上述各项技术的应用,尤其是开发高功率密度、高效率、高性能、高可靠性以及智能化电源系统,仍然是今后通信电源的发展趋势。

3 开关电源技术发展方向

进入21世纪,开关电源技术将有更大的发展。建议我国电力、电子、电源、通信、材料等工业和学术界,努力协作,沿下述方向开发和开关电源相关的产品和技术。

3.1 高性能碳化硅(SiC)功率半导体器件

可以预见,碳化硅将是21世纪最可能成功应用的新型功率半导体器件材料,碳化硅的优点是:禁带宽、工作温度高(可达600℃)、通态电阻小、导热性能好、漏电流极小、PN结耐压高,等等。

3.2 高频磁技术

高频开关变换器中用到了多种磁元件,有许多基本问题要研究,如下所述。

a. 随着开关电源的高频化,在低频下可以忽略的某些寄生参数,在高频下将对某些电路性能(如开关尖峰能量、噪声水平等)产生重要影响。尤其是磁元件的涡流、漏电感、绕组交流电阻 R_{ac} 和分布电容等,在低频和高频下的表现有很大不同。虽然,磁理论研究已有多年的历史,但高频磁技术理论作为学科前沿问题,仍受到人们的广泛重视,如磁心损耗的数学建模、磁滞回线的仿真建模、高频磁元件的计算机仿真建模和CAD、高频变压器一维和二维仿真模型等。有待研究的问题还有:高频磁元件的设计决定了高效率开关电源的性能、

损耗分布和波形等,人们希望给出设计准则、方法、磁参数和结构参数与电路性能的依赖关系,明确设计的自由度与约束条件等。

b. 对高频磁性材料有如下要求:损耗小、散热性能好、磁性能优越。适用于兆赫级频率的磁性材料为人们所关注,如5~6 μm 超薄钴基非晶态磁带,1MHz($B_m=0.1\text{T}$)时,比损耗仅为0.7~1W/cm³,是MnZn高频铁氧体的1/3~1/4。纳米结晶软磁薄膜(film)也在研究。

c. 研究将铁氧体或其它薄膜材料高密度集成在硅片上(ferrite on silicon),或硅材料集成在铁氧体上(silicon on ferrite),是一种磁电混合集成技术。磁电电容混合集成等。

3.3 新型电容器

研究开发适合于功率电源系统用的新型电容器,要求电容量大、等效串联电阻(ESR)小、体积小等。据报道,美国南卡罗里那州KEMET电子公司在20世纪90年代末,已开发出330 μF 新型固体电容,其ESR从原来的500m Ω 降到30m Ω 。

3.4 S⁴功率因数校正AC-DC开关变换技术

一般高功率因数(PF)AC-DC电源,由两级组成:在DC-DC变换器前加一级前置功率因数校正器,至少需要两个主开关管和两套控制驱动电路。对于小功率开关电源说,总体效率低、成本高。

对输入端功率因数要求不特别高的情况,用PFC和变换器组合电路构成小功率AC-DC开关电源,只用一个主开关管,可使PF校正到0.8以上,称为单管单级(Single Switch Single Stage,简称S⁴)PF校正AC-DC变换器。例如一种隔离式S⁴PF校正AC/DC变换器,前置功率因数校正器用DCM运行的Boost变换器,后置电压调节器主电路为反激变换器,按CCM或DCM运行;两级电路合用一个主开关管。当然,如果加有源钳位或其他软开关技术,还需要一个辅助开关管,称为单级(Single Stage,简称S²)有隔离PF校正软开关电源。

香港理工大学报道了S²有隔离PF校正软开关电源的实验结果:80W、150kHz效率86.5%,功率因数0.98,THD 13%,输入、输出电压分别为110VAC和28V DC。

3.5 低电压、大电流DC-DC变换器模块——VRM

IEEE Spectrum 报道, 2005年数据处理器所用的大规模集成电路的晶体管密度将达到1亿/cm², 时钟频率为1GHz, 特征尺寸≤100nm(见表4)。

表4 超大规模集成电路十年发展前景预测

	1997~2001	2003~2006	2009~2012
晶体管密度(10 ⁶ /cm ²)	4~10	18~39	84~180
特征尺寸(nm)	250~150	130~100	70~50
频率(MHz)	200~230	530~1100	840~1830
功率(W)	1.2~61	2~96	2.8~109
电压(V)	1.2~2.5	0.9~1.2	0.5~0.9

为适应下一代快速微处理器、可携带式通信设备、服务器等供电的需求, 要开发大电流(50~100A)、低输出电压(小于1V)、电流变化率高(5 A/ns)的电压调整器模块(VRM)。研究新拓扑, 应用高性能元器件, 研究新结构和封装技术, 使体积相当的微处理器与VRM集成封装。图6表示微处理器与VRM集成的一种设想。

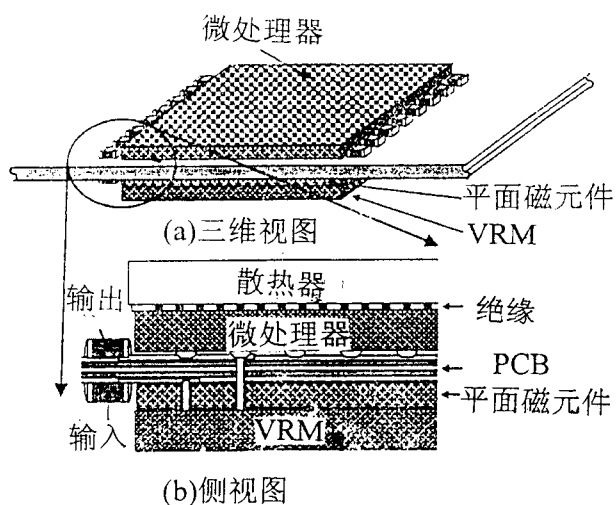


图6 微处理器与VRM集成

3.6 大功率或大电流变换器拓扑

20世纪90年代初, 人们认为400V输入, 100A、48V输出的AC/DC变换器最佳拓扑为全桥式或双管正激式。加拿大北方电信曾做出200A、48V输出的全桥式AC/DC变换器。近年来人们还在继续研究大功率或大电流变换器最佳拓扑, 例如双向(低压大电流)DC-DC

变换器拓扑和三电平DC-DC变换器拓扑等。实际上, DC-DC变换器中并没有多电平之说, 这里所谓‘三电平’(three level, TL)借用了多电平逆变器的一个名词。以三电平半桥DC-DC变换器为例, 桥臂由两个功率开关管串联, 中点接有二极管, 类似于三相三电平全桥逆变器一个桥臂的结构。由于双管串联, 三电平DC-DC变换器的输入端电压可达800~1000V, 可与前级三相APFC输出电压匹配, 输出功率也大。

3.7 高频开关电源的电磁兼容研究

高频开关电源的电磁兼容问题有其特殊性。通常, 它涉及到开关过程产生的di/dt和dv/dt, 引起强大的传导型电磁干扰和谐波干扰。有些情况还会引起强电磁场(通常是近场)辐射。不但严重污染周围电磁环境, 对附近的电气设备造成电磁干扰, 还可能危及附近操作人员的安全。同时, 开关电源内部的控制电路也必须能承受主电路及工业应用现场电磁噪声的干扰。由于上述特殊性和测量上的具体困难, 专门针对开关电源电磁兼容的研究工作, 目前还处于起始阶段。显然, 在电磁兼容领域, 存在着许多交叉科学的前沿课题有待人们研究。如: 典型电路与系统的近场、传导干扰和辐射干扰建模; 印刷线路板和开关电源EMC优化设计软件; 中低频、超音频及高频强磁场对人体健康的影响; 大功率开关电源EMC测量方法的研究。

3.8 通信开关电源的设计、测试技术

建模、仿真和CAD是一种新的、方便且节省的设计工具。为仿真开关电源, 首先要进行仿真建模。仿真模型中应包括电力电子器件、变换器电路、数字和模拟控制电路、以及磁元件和磁场分布模型, 电路分布参数模型等, 还要考虑开关管的热模型、可靠性模型和EMC模型。各种模型差别很大, 因此建模的发展方向应当是: 数字-模拟混合建模; 混合层次建模; 以及将各种模型组成一个统一的多层次模型(类似一个电路模型, 有方块图等); 自动生成模型, 使仿真软件具有自动建模功能, 以节约用户时间。在此基础上, 可建立模型库。开关电源的CAD, 包括主电路和控制电路设计、器件选择、参数最优化、磁设计、热设计、EMI设计和印制电路板设计、可靠性预估、计算机辅助综合和优化设计等。用基于仿真的专家系统进行开关电源的CAD, 可使所设计的系统性能最优, 减少设计制造费用, 并能做可

制造性分析,是21世纪仿真和CAD技术的发展方向之一。现在国外已开发出设计DC/DC开关变换器的专家系统和仿真用MATSPICE软件。

此外,开关电源的热测试、EMI测试、可靠性测试等技术的开发、研究与应用也是应注意研究的。

参考文献

- [1] 蔡宣三, 龚绍文. 高频功率电子学. 北京科学出版社, 1993.
- [2] Tamots Ninomiya. Soft Switching Converters. ShindengenEl. Mfg. Co.Ltd, 1999, Vol. 12.
- [3] Donald T. Staffiere. Power in the Year 2000. APEC'95, Proceedings, 6-11, 1995
- [4] IEEE Trans. on Power Electronics, Nov., 1997
- [5] 2001台达电力电子新技术研讨会论文集. 上海: 台达电力电子研发中心, 2001.

Technological Development of Telecommunication Switching Power Supply

Cai Xuansan

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The technological development and achievements of the switched-mode power supply (SMPS) using in the telecommunication system in the 20th century were reviewed. High power density, high efficiency, high performance and high reliability will still be future development orientation of the SMPS. SMPS technologies to be emphatically developed in China in the 21st century are proposed.

Keywords telecommunication switched-mode power supply (SMPS) power converter

《电信工程技术与标准化》期刊的广告从2002年起由人民邮电出版社国脉广告公司总代理, 广告联系电话 / 传真: (010) 67658660, 67658661。