

GAOPIN GONGLÜ DIANZIXUE

高频功率电子学

蔡宣三 龚绍文 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高频功率电子学

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书论述了高频功率电子学的理论基础和分析方法。高频功率电子学的主要研究内容是高频功率变换器的功率开关器件、功率变换原理及其控制、电路与系统分析等。

本书主要内容包括：全控型功率半导体器件、PWM 开关型和谐振开关型功率变换器的拓扑和理论分析、对偶分析、高频磁元件和集成磁路、功率变换器的控制，并以开关稳压电源（SAVR）为例阐明高频功率电子系统的小信号分析与综合、大信号分析、数字仿真分析。

本书可作为高等工科院校教师、高年级学生、研究生的教学参考用书，也可供有关工厂、研究所科研、开发和设计人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

高频功率电子学/蔡宣三，龚绍文著．—北京：中国水利水电出版社，2009

ISBN 978-7-5084-6290-5

I. 高… II. ①蔡…②龚… III. 高频-电子学 IV. TV710.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 022131 号

书 名	高频功率电子学
作 者	蔡宣三 龚绍文 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 25.75 印张 611 千字
版 次	2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	72.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

根据研究对象的不同,电子学可划分为信息电子学 (Information Electronics) 和功率电子学 (Power Electronics)。前者主要研究信息处理,可由微电子技术实现;后者主要研究功率处理 (Power Processing) 或功率变换 (Power Conversion),由功率半导体技术、微电子技术和控制技术实现。

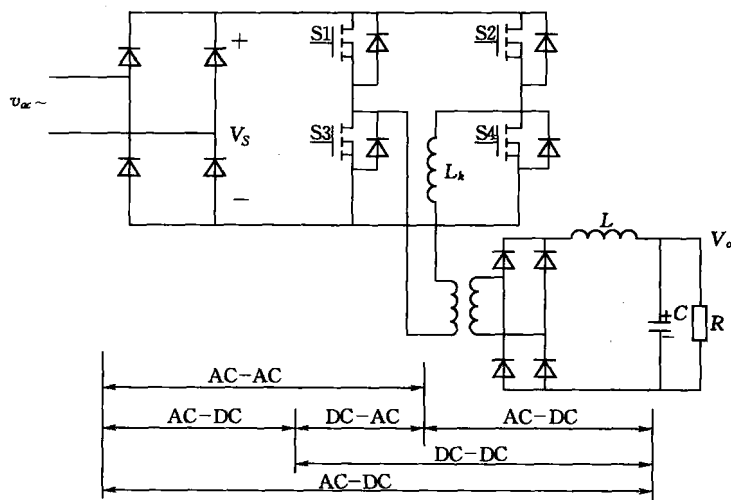
功率变换技术可分 4 种:

(1) AC-DC 变换,将交流电压变换为某一数值的直流电压,通常简称为变换 (Conversion)。常用的整流 (Rectification) 技术是最基本、最简单的 AC-DC 变换。也可以由整流和 DC-DC 变换两级串联,组成 AC-DC 变换。

(2) DC-DC 变换,将某一数值的直流电压变换为另一数值的直流电压。

(3) DC-AC 变换,将直流电压变换为某种波形、某一频率和某一电压的交流电,称为逆变,通常简称为逆变 (Inversion)。

(4) AC-AC 变换,将一种波形、频率、电压的交流电变换为另一种波形、频率、电压的交流电,实现交-交变压、变频 (Cyclo-conversion)。AC-AC 变换也可以由整流和逆变电路组成 AC-DC-AC 变换。



典型 AC-DC 变换器的电路拓扑

如上图所示是一个典型的 AC-DC 变换器,它由两级整流 (AC-DC 变换) 和一级逆变 (DC-AC 变换) 组成。由左向右,第一级整流和逆变串联构成 AC-AC 变换 (实际是 AC-DC-AC 变换),将工频正弦输入 v_{ac} 变换为高频方波;逆变和第二级整流串联构成 DC-DC 变换 (实际是 DC-AC-DC 变换)。如上图所示典型 AC-DC 变换器的电路拓扑,包含了上述 4 种功率变换。

功率电子技术的用途甚广，如各种电子电源装置、直流或交流电动机传动控制、直流输电、动态无功功率补偿、电能质量控制、超导磁铁贮能等。功率电子技术的广泛应用对于降低能耗、节约原材料、开发新能源等均有重要意义。

20 世纪 60 年代开始得到人们重视的功率半导体器件如 SCR（晶闸管）等，不能自关断，只限于在直流和工频交流中应用。20 世纪 70 年代起，为降低电工及电子设备的体积、重量，改善动态特性，提高效率，功率半导体器件的研制开发向全控器件（导通或关断均可以控制）和更高频率的方向发展。先后出现了可工作于几十千赫的高频晶闸管、大功率晶体管（Giant Transistor，简称 GTR，或 Bipolar Transistor，简称 BPT）和可工作于几十至几百千赫的功率 MOS 场效应晶体管（Power MOSFET）。

20 世纪 80 年代初研制成功的绝缘栅双极晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，简称 IGBT），将 MOSFET 和 GTR 复合，是一种性能优越的新型器件。进入 20 世纪 90 年代以后，在中小容量的变换器中，IGBT 得到广泛应用，几乎已完全取代了 GTR。

20 世纪末，研制出集成门极换流晶闸管（Insulated Gate Commutated Thyristor，简称 IGCT），结合了 IGBT 与 GTO 的优点，ABB 公司首先成功地应用于电力系统。其典型参数为：4500V、4000A，工作频率 1kHz，正向压降 2.7V。IGCT 在大功率系统中的成功应用，对 SCR 和 GTO 是一个强有力的挑战。

随着高频功率半导体器件的出现，功率电子电路的工作频率也逐步提高。但是，不同的应用场合，“高频”所指的频率范围却不相同。例如，对于远距离通信、雷达、电子对抗，频率高达 GHz 范围；而对于电机驱动控制，20kHz 就属于高频了。20 世纪 70 年代的电子电源装置，从 50Hz 供电的直流线性稳压电源，发展到开关频率为 20kHz 的直流开关稳压电源，这一过程曾被誉为“20kHz 革命”。然而，10 年后，开关电源的开关频率已发展到几百千赫^{[4]、[6]}。

本书主要介绍开关频率为 50kHz 至 1MHz 的开关变换器（Switched - mode Converter）和开关稳压电源（Switching Power Supply）即开关电压调节器（Switching Voltage Regulator），它们是高频功率电子学的主要研究内容之一。它们所应用的功率半导体器件主要是功率 MOS 场效应管、IGBT 以及快速恢复的功率二极管等。

传统的开关变换器的工作原理是频率调制式（改变开关频率）、脉宽调制式（PWM）、或两者结合的调制方式。随着电子设备（如计算机、通信设备、精密电子医疗设备等）的小型化，要求与之配套的开关稳压电源体积更小、重量更轻、效率更高。要实现开关稳压电源的小型化，除了集成化和采用新的封装技术外，更主要的应当使电子变压器、滤波器小型化，这就要求提高开关频率，从 20~500kHz 提高到 1MHz。为了减小开关过程中的器件损耗，在传统的脉宽或频率调制型变换器的基础上又开发了谐振型（Resonant）或准谐振型（Quasi - Resonant）功率变换器，使开关变换器有可能向兆赫级方向发展。谐振变换器的拓扑、工作原理和分析方法和 PWM 变换器相比都有很大不同。

频率的提高，会促使开关变换器的功率密度（单位体积的功率）有很大的提高，有利于小型化；但同时开关应力、噪声、损耗、发热与散热等问题也更为严重，电路的分析、设计、工艺问题的难度也增大了，这些都是兆赫级功率开关变换器广泛应用受到限制的主要原因，有待国内外功率电子专家们的共同努力。

现在功率电子技术已广泛应用到工业、民用和国防的各个领域，从家庭、办公室、潜艇、汽车、工业机器人直至航空航天技术。开关变换器已成为一次能源（如太阳能光伏电池、燃料电池）与电网间的自然中间接口，并成为大多数不间断电源（Uninterrupted Power Supply）的核心部件。国内外功率电子学界在开关型功率变换器的拓扑、控制、磁元件、建模、分析、仿真和设计以及开发高频功率半导体器件、磁元件等方面，做了大量卓有成效的研究工作。

本书是作者在总结多年来从事开关功率变换器及开关稳压电源的教学和科学研究经验的基础上编写而成的，目的是希望能提供广大读者在这一科学领域内的理论基础的参考用书。读者对象主要是高等学校电工自动化技术专业的教师、本科生和研究生，以及电源界、功率电子学界的工程师和设计人员。本书涉及的知识面较广，综合了电路理论、磁路理论、控制理论，以及电子技术、计算机仿真技术等有关理论的基础内容。

本书第一～三章、第五章、第六章初稿由北京理工大学龚绍文教授撰写，其余各章由清华大学蔡宣三教授撰写，并修改、补充、整理全书。

第一章介绍了功率电子技术中常用的全控功率半导体开关器件，第二章介绍了 PWM 型 DC-DC 变换器的工作原理和稳态分析，第三章介绍了谐振型 DC-DC 变换器的工作原理和稳态分析，第四章介绍了对偶分析在开关变换器中的应用，第五章介绍了开关变换器常用的磁元件及集成磁件的概念，第六章介绍了 DC-DC 变换器的动态小信号分析，第七章介绍开关型功率变换器的控制及 PFC 变换器，第八章介绍了开关稳压电源的瞬态小信号分析与综合，第九章介绍了开关稳压电源的大信号分析，第十章介绍了开关稳压电源的数字仿真技术。

本书的编写和出版，得到许多同行专家的帮助和支持：北京理工大学李翰荪教授对初稿提出不少宝贵意见，南京航空航天大学邢岩教授、清华大学陈建业教授、李永东教授分别提供了有关资料；上海中达电通公司总经理王其鑫先生曾给予很大支持；清华大学电机工程系硕士研究生焦阳协助完成书中的仿真例题；中国水利水电出版社编辑林京、曾佳女士对书稿耐心认真地进行编辑校对，做了大量工作。作者在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促，作者水平有限，书中难免错漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2008 年 10 月

目 录

前言

引论	1
----	---

第一章 高功率半导体开关器件	5
----------------	---

第一节 双极型功率晶体管 (BJT)	5
第二节 功率场效应晶体管 (VMOSFET)	17
第三节 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	29
第四节 开关功率二极管	37
第五节 吸收电路	41

第二章 PWM 型 DC-DC 变换器	49
---------------------	----

第一节 PWM 型 DC-DC 变换器的基本结构	49
第二节 Buck 变换器	53
第三节 Boost 变换器	58
第四节 Buck-Boost 变换器	63
第五节 Ćuk、Sepic 和 Zeta 变换器	67
第六节 PWM 型开关变换器的功率损失	80
第七节 由变压器和开关组成的直流变换器	86
第八节 单端有隔离的 DC-DC 变换器	91
第九节 推挽有隔离的 DC-DC 变换器	95
第十节 半桥有隔离的 DC-DC 变换器	100
第十一节 全桥有隔离的 DC-DC 变换器	102
第十二节 有耦合电感的 Ćuk 变换器	106
第十三节 输入、输出零纹波电流的 Ćuk 变换器	108
第十四节 开关型功率放大器	111
第十五节 三态开关变换器	113

第三章 谐振型 DC-DC 变换器	117
-------------------	-----

第一节 概述	117
第二节 串联谐振变换器	118
第三节 并联谐振变换器	132
第四节 串并联谐振变换器	152
第五节 零电流开关准谐振变换器 (ZCS-QRC)	153
第六节 零电压开关准谐振变换器 (ZVS-QRC)	167

第七节 零电压开关多谐振变换器 (ZVS-MRC)	177
第四章 开关变换器的对偶分析	184
第一节 平面电路的对偶性质	184
第二节 开关变换器的基本对偶关系	187
第三节 有隔离的开关变换器的对偶	196
第四节 双向变换器和双向功率流 DC-DC 变换器	202
第五节 PWM 变换器小信号等效电路的对偶	205
第五章 磁元件及集成磁件	208
第一节 磁路的基本定律	208
第二节 电感器和变压器的磁路模型	211
第三节 有耦合电感的开关变换器的磁路、电路分析	215
第四节 有集成磁件的开关变换器的磁路、电路分析	218
第五节 集成磁件的基本综合方法	223
第六节 电感器和变压器的设计方法	224
第六章 DC-DC 变换器的动态小信号分析	234
第一节 动态分析方法概述	234
第二节 CCM 时 PWM 变换器的状态空间平均模型	237
第三节 DCM 时 PWM 变换器的状态空间平均模型	249
第四节 等效受控源电路模型	258
第五节 三端开关器件模型	269
第六节 准谐振变换器的低频小信号模型	276
第七节 三态开关变换器的低频小信号分析	284
第七章 开关型功率变换器的控制	286
第一节 电压型控制	286
第二节 电流型控制	288
第三节 电荷控制	292
第四节 单周控制	293
第五节 前馈控制	295
第六节 PFC 变换器及其控制	299
第七节 数字控制	306
第八节 控制回路中的隔离	309
第八章 开关稳压电源的瞬态小信号分析与综合	311
第一节 开关稳压电源 (SAVR) 的原理与组成	311
第二节 SAVR 系统的瞬态分析	314
第三节 SAVR 系统的频域建模分析	324
第四节 输入滤波器对 SAVR 系统稳定性的影响	329

第五节	电压、电流双闭环控制的 SAVR 系统	332
第六节	SAVR 系统的综合	341
第七节	SAVR 补偿网络参数优化设计	349
第九章	开关稳压电源的大信号分析	354
第一节	SAVR 的大信号分析方法	354
第二节	解析法	356
第三节	相平面法	359
第四节	开关变换器的大信号等效电路统一模型	362
第十章	开关稳压电源的数字仿真	370
第一节	功率电子电路的计算机仿真	370
第二节	ORCAD/PSPICE 及其应用	373
第三节	基于离散时域法的 SAVR 仿真	382
第四节	基于 MATLAB/Simulink 的 SAVR 仿真	391
参考文献		402

引 论

功率电子学 (Power Electronics) 是电工、电子、控制等多个子学科的交叉学科, 功率电子学也称电力电子学。众所周知, 微电子技术的主要功能是信息处理 (Signal processing), 而功率电子技术的主要功能是功率处理 (Power processing)。功率处理的实质是功率变换 (Power conversion), 将某一电压 (或电流、频率、波形) 的电能变换为另一电压 (或电流、频率、波形) 的电能, 功率变换包括可控整流、逆变、变频、DC-DC 等各种变换。

功率电子系统由主电路和控制电路组成, 其中主电路 (即功率变换电路) 是由功率电子器件、功率二极管和电感、电容等储能元件按某种拓扑连接而成。开关型功率变换电路 (Switching-mode power converter, 简称 SC) 的工作机理是: 功率流 (Power flow) 输入功率电子电路, 由于功率半导体开关器件 (或称功率电子器件) 的频繁通断和动态储能元件的充放电作用, 变换为另一电压 (或电流、频率、波形) 后输出。

功率电子系统的控制电路常用高频脉冲调制 (频率调制 PFM 或脉宽调制 PWM) 技术。将一个连续的模拟控制信号调制为高频脉冲数字信号后, 驱动、控制功率开关器件, 使功率变换电路在高频下变换电能。调制频率一般在 $10\text{kHz}\sim 10\text{MHz}$ 之间。脉冲调制频率也称为开关频率 (Switching frequency) 或工作频率。调制频率的高低, 取决于选用的功率电子器件所能达到的开关速度。现在, 大功率变换电路选用 IGCT, 工作功率为 $1\sim 10\text{kHz}$; 中等功率变换电路, 常选用 IGBT, 工作频率为 $10\sim 20\text{kHz}$; 小功率变换电路, 可选用功率 MOSFET, 工作频率 $20\text{kHz}\sim 10\text{MHz}$ 。

高频功率电子系统的应用日益广泛, 深入到以下几个方面: 各种电源、电力系统、运动控制以及照明、电动汽车驱动等。

电源有直流输出的开关稳压电源、不间断电源 (UPS)、焊接与加热电源、特种电源等。AC-DC 和 DC-DC 开关稳压电源 (Switching-mode Power Supply, 简称 SMPS) 又称为开关型自动电压调节器 (Switching Automatic Voltage Regulator, 简称 SAVR), 是典型的高频功率电子系统。20 世纪 60 年代 20kHz 脉宽调制型 (PWM) 开关稳压电源问世, 逐步取代了线性稳压电源和晶闸管 (SCR) 相控稳压电源, 并自 20 世纪 70 年代开始逐渐成为现代直流稳压电源的主流, 高频谐振式开关稳压电源的工作频率可达 MHz 级, 有多方面的应用和发展。开关型自动电压调节器的名称繁多, 除 SMPS 和 SAVR 外, 在早期的通信系统中称为开关型整流器 (Switching-mode Rectifier, 简称 SMR)、分布电源系统和计算机电源系统中称为电压调节器模块 (Voltage Regulator Module, 简称 VRM); AC-DC 开关电源的输入电流波形整形 (Input Current Shaping) 称为有源功率因数校正 (Active Power Factor Correction, 简称 APFC) 等。

电力系统中的应用有: 太阳能光伏发电和燃料电池发电系统的电能变换、高压直流输电 (HVDC) 系统、有源功率滤波装置 (APF)、静止无功补偿装置 (STATCOM)、动

态电压恢复装置 (DVR)、超导磁铁储能系统 (SMES)、风力发电及其并网控制等。

运动控制系统在国防、工业中有大量应用, 典型的是电力传动自动控制。

功率电子系统的特点是高频、大功率、开关状态运行, 使功率电子电路具有强非线性和离散性, 并必须考虑电路的分布参数性质; 与电子技术不同的是, 功率电子技术更关注损耗、效率和瞬态热流分布等问题。功率电子学的基本理论是功率电子“器件、电路和系统”理论。功率电子器件理论包括可控功率半导体器件物理、瞬态热分析、器件的建模等; 功率电子电路理论有: 功率变换原理, 建模分析、设计, 储能元件分析与设计等; 功率电子系统理论则包括: 系统建模分析与设计、控制、集成、电磁兼容分析等。

本书按这一理论体系, 以工作频率为 $50\text{kHz}\sim 10\text{MHz}$ 的高频功率电子系统为例, 阐明器件 (第 1 章)、电路和元件 (第 2~6 章)、系统 (第 7~10 章) 的基本理论。近半个世纪以来, 高频功率电子学的理论和应用技术, 尤其是 SMPS, 有了更迅速的发展。科研成果越来越丰富, 其中包括:

1. 功率半导体器件

功率 MOSFET 和 IGBT 已完全替代功率晶体管 (GTR) 和中小电流晶闸管, 并使功率电子技术实现高频化有了可能。超快恢复功率二极管和同步整流 (用功率 MOS 管作为开关二极管) 技术的开发, 也为高效率或低电压输出高频功率变换技术的研发创造了条件。功率半导体器件的性能提高主要体现在低通态压降、快速性和高耐压能力等方面, 在智能化、模块化和集成化等方面也有重大进展。而寻求功率半导体器件的理想半导体晶片材料如碳化硅 (SiC) 等, 也将是提高其性能的努力方向之一。

2. 软开关技术

开关变换器 (SC) 的高频化可以缩小其体积、重量, 提高功率密度。但频率越高, 开关损耗也越大。为此, 过去几十年中人们对软开关技术 (包括零电压开关 ZVS、零电流开关 ZCS) 进行坚持不懈的开发研究, 已取得很大成就。降低了开关损耗。功率变换器总体效率也有了很大的提高, 相继出现了谐振、准谐振、ZVS 和 ZCS-PWM 以及移相控制 ZVS-PWM 等软开关变换器。

能否进一步提高 SC 的功率密度, 与开关器件、无源元件性能以及封装技术等有很大关系。现在与 20 世纪 90 年代中期对比, SC 的可靠性增加了 1 倍, 成本降低了一半, 而功率密度已提高了 1 倍。

3. 控制技术

SC 的强非线性、离散和变结构性质, 使控制技术和控制器的设计较为复杂。电流型控制及多环控制 (Multi-loop control) 已在高频功率电子系统设计中得到广泛应用; 电荷控制 (Charge control)、一周周期控制 (One cycle control)、 H_∞ 控制等新的控制技术的开发及相应专用集成控制芯片的研制成功, 使功率电子系统动态性能有了很大的提高, 控制电路也大幅度地简化了。一些新的控制方法如自适应控制、模糊控制、神经网络控制以及各种调制策略在 SC 控制中的应用, 已引起人们的注意。

SC 的控制已经由模拟控制、模数混合控制, 进入到全数字控制 (Full digital control)。全数字控制是一个新的发展趋势, 其优点是: 数字信号与混合模数信号相比可以标定 (Scale) 更小的量、芯片价格更低廉、对电流检测误差可以进行精确的数字校正、电压检测

更精确,可以实现快速、灵活的控制设计等。

实时数字控制可以使 SC 的性能更好,能改善电路的瞬态响应特性,使之速度更快、更精确、更可靠。数字控制可以实现精细的非线性算法、对多部件的分布式电源系统进行监控、减少测试和调整的时间,使生产率更高。

DSP (Digital Signal Processor) 控制使得某些依赖于高速数值运算的复杂控制策略的实现成为可能。可编程逻辑器件 (PLD) 如 CPLD (复杂可编程逻辑器件)、FPGA (现场可编程门阵列) 的应用^①,使许多功率变换器可实现全数字控制。但是在小功率电源中还用得较少,其原因是:200kHz 的 DC-DC SC 的数字频带不够宽,全数字控制的费用比较高,这两方面原因阻碍了开关电源全数字化控制的应用与发展。近年来,开关电源的高性能全数字控制芯片 (IC) 已有开发,费用也已降低。欧美已有多家公司开发并制造出 SC 的数字控制芯片及软件。

4. 有源功率因数校正技术

由于 AC-DC 变换器的 AC 输入端接整流-电容滤波电路,在正弦电压输入时,电网侧(输入端)功率因数仅为 0.6~0.65,输入电流的总谐波畸变 (THD) 达到 126%。用有源功率因数校正技术 (简称 APFC),输入端功率因数可提高到 0.9~0.99,输入电流 THD 小于 10%,有功功率输出提高 30%以上。既治理了电网的谐波“污染”问题,又提高了电源的整体效率,可节约电能 30%,如果需要增加一级 PFC 电路,小功率开关电源的成本要上升 10%。现在单相 PFC 变换技术已广泛得到应用,并已产品化。三相 PFC 变换器和单级 PFC 变换器的拓扑类型较多,还在发展中。

5. 高频磁元件

高频磁技术的进步促进了高性能和小型化高频 SC 的发展。平面变压器的应用可使高频 SC 扁平化、薄型 (Low Profile) 化,其高度可小于 1cm,适用于便携式 (Portable) 电子设备及板上 (On board) SC。将多个磁元件 (如变压器和电感) 集成在一个磁心上 (称之为集成 TL 磁件),可以减小 SC 体积,降低损耗。目前已有 50W、100kHz 集成磁件 (Integrated Magnetics) SC 产品问世。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 SC 的厚度仅为 0.21in (0.5334cm),功率密度达 150W/in³ (9.15W/cm³)。串联谐振变换器的 LC 谐振元件和变压器可集成在一个平面磁心上 (称为 LCT 集成磁件),在集成磁件基础上可以进一步开发集成功率电子系统。

6. 电压调节器模块 VRM

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达 1V,而电流达 100A 以上,其供电电源称为电压调节器模块 (Voltage Regulator Module, 简称 VRM),是一种低电压、大电流 DC-DC 变换器模块。新一代微处理器对 VRM 的要求是:输出电压低、输出电流大、电流变化率高、快速响应等。

现在已有多种 VRM 拓扑问世,例如,同步整流 Buck 变换器、多输入通道 (Multi-Channel 或 Multi-phase) DC-DC 变换器。应用波形交错 (Interleaving) 技术的 VRM,

① CPLD—Complex Programmable Logic Device
FPGA—Field Programmable Gate Array

具有输出纹波小、瞬态响应好、输出滤波器小等特点，并可防止寄生参数引起的输出电压扰动的问题。

7. 分布式电源及并联均流技术

分布式电源系统 (Distributed Power System, 简称 DPS) 是直流电源系统发展方向之一。通过 250~425V/48V DC-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 SC，将 48V 变换为负载所需的低电压。这种 SC 的功率密度大、效率高，并且是可并联的。分布电源系统适合应用于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，其优点包括：可降低 48V 母线电流和电压降、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 SC 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。

8. EMI 与 EMC

功率电子系统的电磁噪音 (电磁干扰 EMI)，主要来自主开关器件的开关作用所产生的电压变化率 $\frac{dv}{dt}$ 、电流变化率 $\frac{di}{dt}$ 。 $\frac{dv}{dt}$ 和 $\frac{di}{dt}$ 越大，电磁噪声越大。由于电路中寄生参数的存在，EMI 将在主电路中传播，受扰体若是控制电路，则 EMI 将导致系统控制失误或失灵，造成电路故障或损坏，影响可靠性。研究 EMC、EMI 在 SC 中的传播特性、抑制控制电路中 EMI 扰动的方法、EMI 辐射等问题至关重要，已引起学术界、产业界的注意。

9. 压电变压器

压电变压器 (Piezo-Electric Transformer, 简称 PET)，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，不属于磁元件的范围。在高频 SC 中应用 PET，可实现 SC 的轻、小、薄和高功率密度。这是 20 世纪 90 年代以来国际上 SC 领域的研究热点之一，包括压电材料的损耗评估、PET 设计方法、仿真、参数分析、振动速度极限、PET 的高频性能等。

10. 新型电容器

适合于功率电子系统用的新型超容电容器 (Ultra-Capacitor)，要求电容量大、等效串联电阻 (ESR) 小、体积小等特点。超容电容器的开发应用也引起了人们的注意。超容电容器利用碳电极表面产生的双层电极，其能量密度达 0.2~10Wh/kg，功率密度达 100~5000W/kg，充电时间和放电时间约为 0.1~100min，周期寿命 (Cycle Life) 大于 10000h。

以上介绍了 40 年来功率电子技术的若干重要发展概况，当然新技术发展实际上远不止这些，新材料、新器件、新技术发展层出不穷，有关高频功率电子学的科技文献也浩如烟海，但是它们都有共同的理论基础。掌握若干最基本的开关变换理论及 SC 的控制理论是十分重要的，例如 PWM 和谐振 SC 的基本理论和拓扑、全控型功率半导体器件和磁元件的基本原理和概念、SC 的控制、瞬态运行机理、小信号和大信号分析方法以及系统的综合和仿真技术的原理等。本书分别对高频功率电子技术的基本概念、基本原理和基本分析方法作了较详尽的介绍。书末给出的参考文献目录可供读者参考。

第一章 高频功率半导体开关器件

在高频开关变换电路与系统中，经常要用到功率开关器件。在几十千赫到几兆赫的电力电子电路与系统中，常用的功率开关器件包括双极型功率晶体管、功率场效应晶体管、IGBT 和功率开关二极管等。本章从功率开关器件角度简要介绍这些功率开关变换电路中常用的半导体器件。

第一节 双极型功率晶体管 (BJT)

双极型功率晶体管是高频开关变换器（几十至几百千赫）早期常用的一种开关器件。它在最大工作电压、最大工作电流、器件导通损失等方面与功率场效应管相比有一定的优越性。本节简述双极型晶体管的结构、工作原理，以及用作开关管时的特性与参数、使用特点等。

一、双极型晶体管的结构，符号与工作原理

双极型晶体管的结构示意图如图 1-1-1 (a) 所示，这是一个 NPN 型晶体管，利用光刻、扩散等半导体工艺制成。在高掺杂的 N^+ 型衬底上形成低掺杂的 N^- 型外延层，在 N^- 型外延层的一个区域内扩散受主杂质形成 P 区作为基区，再扩散施主杂质形成高掺杂的 N^+ 区作为发射区。当有信号时，此类晶体管参与导电的载流子既有电子，也有空穴，所以称为双极型。它的电路符号如图 1-1-1 (b) 所示。

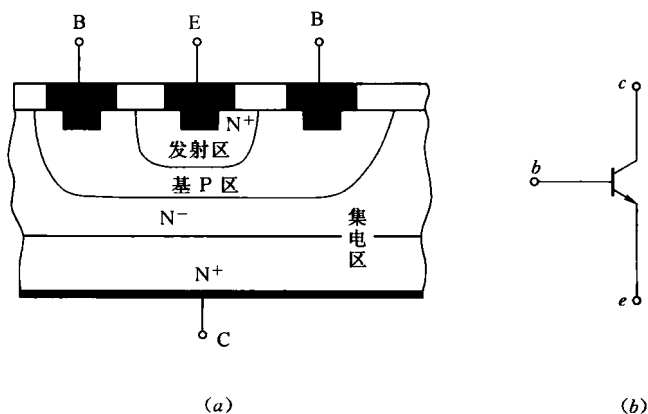


图 1-1-1 双极型晶体管的结构与符号

(a) 结构；(b) 符号

从结构上看，双极型晶体管是垂直导电的，所以芯片面积利用率较高，电流耐量可做得较大。由于设置低掺杂的高阻区，电压耐量也可做得较高，因此适于作功率开关器件。

电力电子电路与系统中，晶体管常为共射极接法，如图 1-1-2 所示。下面以图 1-1-2 为例，简述双极型晶体管的工作原理。

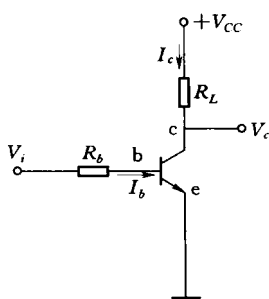


图 1-1-2 双极型晶体管的共射极连接

双极型晶体管是一种电流控制器件。稳态运行时，基极电流的大小可以控制集电极电流的大小。在不同的基极电流作用下，晶体管可能有三种工作状态，即截止状态、放大状态和饱和状态。

当 $V_i < 0$ 时， $V_b < 0$ ，基极电流 $I_b < 0$ ，发射结和集电结反偏，空间电荷区宽度很大，势垒电压高，发射区多数载流子电子无法扩散到基区，也就无法被集电结所收集。只有少数载流子空穴的漂移运动产生极小的电流，一般可忽略不计。此时，晶体管像断开一样，称为截止状态。

当 $V_i > 0$ 并使 $V_b > 0.5V$ 时，基极电流 I_b 为某一正值。这时发射结正偏，发射结空间电荷区宽度变窄，势垒电压降低，发射区中的大量电子注入基区，除很少一部分与基区中的空穴复合形成基极电流 I_b 外，大部分被处于反向偏置的集电结所收集，形成较大的集电极电流 I_c 。此时，在基区中靠近集电结处的少数载流子电子的浓度为零，而靠近发射结处的电子浓度有一定的值，在基区中形成一定的浓度梯度，这个梯度的大小与集电极电流的大小相对应，如图 1-1-3 中直线 1 所示。图 1-1-3 中横坐标 x 表示基区宽度 x_0 中的某点，纵坐标 n_p 为电子浓度。直线下与坐标轴形成的面积对应一定的基区存储电荷，亦即对应一定的基极电流 I_b 。

当 V_i 增大时， V_b 变大，发射结空间电荷区宽度更窄，势垒电压变得更小，扩散变得更易进行，基区的电子积累变得更多，因此浓度梯度变得更大，对应的集电极电流 I_c 也更大，如图 1-1-3 中直线 2、3 所示，称为放大状态。在这个阶段， I_c 随 I_b 按比例增加即

$$I_c = \beta I_b \quad (1-1-1)$$

式中： β 为电流放大系数。

当 V_i 继续增加，使基极电流 I_b 增加到使基区电子浓度如图 1-1-3 中直线 3 所示时，即达到了基区电子浓度的最大值，称之为放大与饱和的临界状态。这时的集电极电流称为临界饱和集电极电流，用 I_{cs} 表示，相应的基极电流称为临界饱和基极电流，用 I_{bs} 表示。即

$$I_{bs} = \frac{I_{cs}}{\beta} \quad (1-1-2)$$

当 V_i 继续增加时， V_b 也增加，基极电流 I_b 随之增加，但基区的电子浓度梯度不再增加而是维持不变。因此，集电极电流也不再增加，维持饱和电流。其原因是：当集电极电流增加到饱和电流时，晶体管集电结电压减小，以致正偏，使其收集从发射结扩散过来的电子的能力达到饱和。这时，当基极电流增加时，基区电子浓度直线的斜率不变，而平移上升，如图 1-1-3 中曲线 4 所示。这表示随着基极电流的增加，集电极电流不变，但

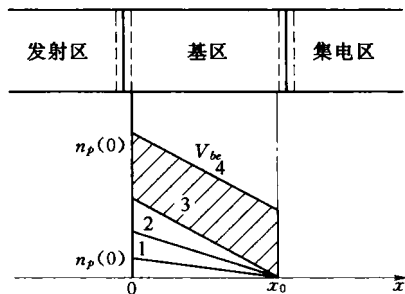


图 1-1-3 基区电荷分布

基区存储电荷增加。图 1-1-3 中阴影部分表示饱和后多余的存储电荷，用 Q_{bs} 表示。 I_b 越大，饱和越深， Q_{bs} 越大，这就是晶体管的饱和状态。

二、双极型晶体管的主要特性和参数

对于作为开关使用的双极型晶体管而言，下面几个特性和参数是十分重要的。

（一）开关特性和开关时间

仍以图 1-1-2 为例讨论晶体管的开关特性。所谓开关特性是指在晶体管的基射间加一突变的导通或截止信号以后，集电极电流或集电极电压随时间变化的情况。

由于晶体管不可能是完全理想的，所以晶体管的导通和截止都不会瞬时完成，而需要一定时间。在开关过程中，由截止状态经放大状态到饱和状态（开通时）或由饱和状态经放大状态到截止状态（关断时）所需的时间，是开关晶体管的重要参数。为区别稳定状态和动态过程，选用不同的名词来表示“开”和“关”的两个稳定状态和两个动态过程，稳态时的两个状态分别称为“导通”和“截止”；而动态情况下“开”和“关”的两个过程，分别称为“开通”和“关断”。

从研究开关特性的角度，可以把双极型晶体管看成一个电荷控制器件，这里的电荷可以理解为基区少数载流子存储电荷（与输入电流 I_b 对应）。开关过程就是基区中少数载流子的建立与消失的过程。下面讨论双极型晶体管的开通过程和关断过程，假定所加的驱动信号足以使晶体管饱和或截止。

1. 开通过程

从加开通信号时刻起到管子开始进入饱和所需要的时间称为开通时间。为了工程测量的方便，把这个时间定义为：从加开通信号的时刻起，到集电极电流上升到其最大值的 90% 止，所需要的时间，用 t_{on} 表示。

开通时间 t_{on} 由延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 两部分组成，如图 1-1-4 所示。

（1）延迟时间 t_d 定义：从加开通信号起到集电极电流 i_c （描述动态过程中的变量用相应的小写字母表示）上升到其饱和值的 1/10（即 $0.1I_{cs}$ ）止所需的时间。其实质是反映管子从截止状态到开始进入放大状态的时间。

在开通信号加入前，管子是截止的，发射结反偏，发射结空间电荷区较宽，输入信号由 $-V_{i2}$ 突变到 V_{i1} （见图 1-1-4）时，基极电流立即产生，但 i_c 的增长有一个延迟过程。这时，注入基极的空穴首先填充发射结空间电荷区，使其宽度变窄，空间电荷量由大到小，这相当于发射结电容放电，使发射结电压由负到零，又给发射结正向充电，使其结电压由零到正。当发射结电压达

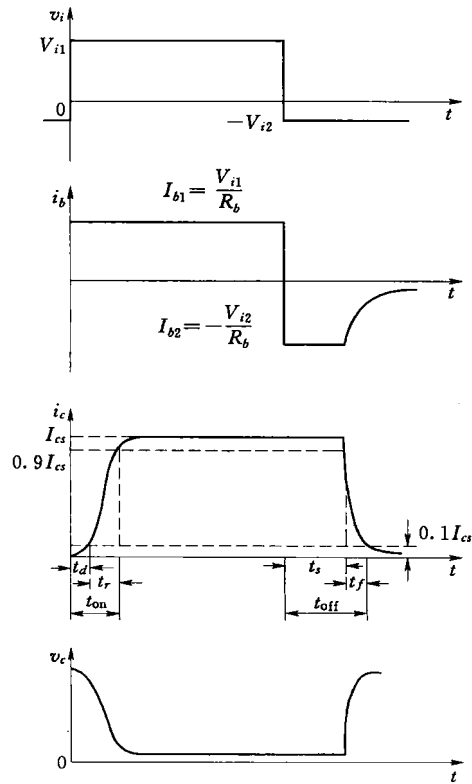


图 1-1-4 晶体管的开关特性

到其导通电压 V_{jo} (0.5V 左右) 时, 发射区开始向基区注入电子, 扩散到基区的电子被集电结收集才形成集电极电流。这个过程所需的时间即为延迟时间 t_d 。

从晶体管本身来讲, t_d 取决于发射结电容的大小。结电容小, t_d 就小, 反之亦然。同时, t_d 也与电路条件有关。如截止时反偏越负, t_d 越大; 正向驱动电流越大, t_d 越小。

(2) 上升时间 t_r 定义: 集电极电流从 $0.1I_{\alpha}$ 上升到 $0.9I_{\alpha}$ 时所需要的时间。其实质是管子从开始进入放大区到开始进入饱和区所需要的时间, 也就是从开始在基区建立起一定的电子浓度梯度到其浓度达到最大值的时间。

在此阶段, 由于发射结正偏, i_b 保持不变, i_b 继续向发射结势垒电容充电, 发射结电压继续升高, 发射区注入到基区的电子显著增多, 基区电子浓度梯度增大, 即集电极电流迅速增大。

在集电极电流增大的同时, 负载电阻 R_L 上的电压升高, 集电结的反偏电压减小, 直到偏压为零, 达到饱和。在集电结电压减小的过程中, 集电结空间电荷区变窄, 这必然需要基极电流对集电结势垒电容充电。

因此, 在集电极电流上升过程中, 基极电流包括四个部分: 一部分作为发射结势垒电容充电电流; 一部分作为集电结势垒电容充电电流; 一部分作为基区的复合电流; 一部分使基区电荷积累不断增加。

因此, 就晶体管本身而言, t_r 的大小主要取决于发射结电容和电流放大系数 β 的大小。发射结电容大则 t_r 大、反之亦然; 且 β 大则 t_r 小。从电路条件上看, 驱动电流 i_b 越大, t_r 越小。

在 $t > (t_d + t_r)$ 以后, 集电极电流不再增加, 维持在 I_{α} 。而基极电流 I_b 大于临界饱和基极电流 I_{α}/β , 其差值 $I_{bx} = I_b - \frac{I_{\alpha}}{\beta}$ 形成了多余的空穴电流, 称为过驱动电流。这些空穴在基区积累起来。与这些空穴等量, 基区中的电子浓度直线就按临界饱和时的浓度梯度向上平移。由于过驱动电流提供的空穴不断填充发射区和集电区, 使这两个结的空间电荷区宽度都变窄, 结电压正方向升高。当集电结电压从零偏压达到正偏压后, 过驱动电流提供的空穴就由基区注入到集电区, 并在集电区积累起来, 晶体管达到饱和。在饱和状态下, 有空穴注入到集电区 (原来的高阻区), 这是双极型晶体管与功率场效应管相比导通电阻要小的主要原因。

饱和时, 基区和集电区超过临界饱和时的电荷积累 Q_b 称为超量存贮。这些超量存贮的电荷是非平衡载流子, 它们要发生复合, 形成复合电流。当总复合电流等于基极电流 I_b 时, 超量存贮过程达到动态平衡, 晶体管进入了稳定的饱和状态。

2. 关断过程

从加关断信号时刻起, 到晶体管截止的时间, 称为关断时间 (见图 1-1-4)。

关断时间 t_{off} 是由存储时间 t_s 和下降时间 t_f 组成的。

(1) 存贮时间 t_s 定义: 从关断信号加入起到集电极电流下降到 $0.9I_{\alpha}$ 为止所需要的时间。其实质是晶体管从过驱动稳定饱和状态到临界饱和状态所需要的时间。

在关断信号加入前, 管子处于过驱动饱和状态, 具有超量存储电荷 Q_b 。因此, 这个超量电荷在关断信号 $-V_{i2}$ 作用下, 马上形成反向的基极电流 $-V_{i2}/R_b$, 使 Q_b 逐渐消失。但在