

高等学校试用教材

# 开关电源技术教程

KAIGUAN DIANYUAN JISHU JIAOCHENG

张占松 张心益 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

高等学校试用教材

# 开关电源技术教程

张占松 张心益 编著



机械工业出版社

本书系统地论述了开关电源的工作原理、理论计算过程、各种实际应用及设计方法，让读者能够掌握基本的设计与计算。在此基础上，本书还系统地论述了高频软开关技术的工作原理、理论计算和实际工程应用的设计方法。本书还论述了反馈控制、小信号分析方面的内容，从而让读者能在实际工程应用中掌握小信号、反馈控制的测量、分析和校正方面的技术。作为一本工程技术人员的参考书，本书还给出了磁性元件、PWM 控制芯片等的一些参考图表、数据，供读者设计开关电源时参考。

本书可供电子、信息、通信、仪表专业本科、专科学生使用，也可以作为电子工程技术人员的设计参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

开关电源技术教程/张占松, 张心益编著. —北京: 机械工业出版社, 2012. 8

高等学校试用教材

ISBN 978-7-111-39183-8

I. ①开… II. ①张…②张… III. ①开关电源—高等学校—教材  
IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 164170 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王 欢 责任编辑: 王 欢

版式设计: 纪 敬 责任校对: 张 媛

封面设计: 路恩中 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12.25 印张 · 300 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-39183-8

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 序

随着我国 IT 和通信产业的迅猛发展，高频开关功率变换技术及相关产业也得到了快速发展。从而对高频开关功率变换技术的创新，以及专业人才的需求，都提出了更高的要求。越来越多的人从事高频开关功率变换技术的研究、开发、设计、制造。高频开关变换技术已经成为电力电子技术应用的一个重要分支。

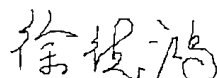
近十年来，我国许多大学在开设电力电子技术课程的基础上，陆续开设了有关高频开关功率变换技术的课程，但是目前关于高频开关功率变换技术的基础教材还不多见。

张占松教授长期从事开关电源变换技术的教学和研究工作，具有很高的造诣。张心益老师也有长期从事开关变换技术产品的研发和生产经验。为了更好地开展高频开关功率变换技术知识的传授和推广，面向电气工程、自动化、电子信息、通信等专业需要学习高频开关功率变换技术的人才，两位张老师撰写了此书。

全书系统地论述了高频开关功率变换技术的原理、分析及设计方法；在此基础上论述了谐振式软开关技术的原理和设计方法；介绍了开关变换器小信号动态分析方法，高频开关功率变换器的闭环控制设计方法；介绍了磁性元件设计、PWM 控制芯片应用、保护电路等内容。此书特色是系统性较强、深入浅出，可以系统地培养读者综合运用各知识的能力。

相信此书对于推动开关电源技术的普及和推广，具有很好的促进作用。

浙江大学 徐德鸿教授



2010年9月9日

# 前 言

作为新兴的、具有节能效果的高频开关功率变换技术，其使用已越来越广泛，几乎进入了每个家庭。我们的日常生活中随处可见高频开关功率变换器的踪影，越来越多的学生、工程技术人员、电气维修技术人员都想系统地学习高频开关功率变换技术的相关知识。而且随着电子产品专业分工的深入，高频开关功率变换器作为一个独立的部件已经由专业生产厂商独立生产，而整机设备生产厂商只需到专业生产厂商去选择标准的高频开关功率变换器就可以了。

因而，对于不同的实际需求，就会需要不同的关于高频开关功率变换技术的知识。但是，目前还是缺乏系统地介绍高频开关功率变换技术基本原理、理论计算、实际工程应用设计方面的书籍。满足这些需要也是作者编写本书的主要目的。本书意在将高频开关功率变换技术以其相对独立的理论体系，来建立一门跟机电类各专业都紧密相关的技术课程，让读者能够熟练掌握高频开关功率变换器的基本原理、工作特点、性能参数及使用方法，以及高频开关功率变换器的设计方法、调整方法，以期满足社会对此类高频开关功率变换技术人才的迫切需求。

本书是在2010年出版的《高频开关变换技术教程》的基础上进行了修订，并增加了较多实用内容，更符合目前教学的需要。并且，在多次专业会议上，与会专家建议将书名中的“高频开关变换技术”改为“开关电源技术”更符合目前教学的需要和业内的习惯，所以将本书书名定为《开关电源技术教程》。

本书首先介绍了高频开关功率变换技术的基本原理，给出了一些和基本原理紧密联系的理论计算公式，删减了一些比较深入的、可作为理论研究的问题，让读者能够容易理解，学懂高频开关变换器的基本理论。首先，本书给出了四个最基本的拓扑结构。对于这四个拓扑结构，本书用简洁的语言、简单的数学工具、简单明了的波形图来说明其工作原理、工作特点及设计方法。对于一些不是很广泛应用的拓扑结构，本书作了删减。

本书第二章重点介绍了目前常用的IGFET和IGBT，但不包括已淘汰的双极型晶体管的内容。同时，也介绍了基本的、经典的IGFET和IGBT的驱动电路，让读者能够更好地掌握IGFET和IGBT的性能和使用方法。

第三章介绍了高频开关功率变换器的磁性元件，用非常简单、直观的方式介绍了变压器的设计、电感器的设计，并介绍了大量的设计图表，让读者学会如何利用现有的图表资料来进行磁性元件的设计。

本书也使用了一些实例来介绍各种不同的隔离型拓扑电源。介绍实例中的设计方法都是实际工程应用的方法。

对谐振式软开关变换器，本书花了一些篇幅重点介绍软开关变换器的工作原理、工作方式，意在让读者明白谐振工作的过程。只有了解了工作过程，才能更好地设计其控制电路。最后，给出了谐振变换器的工程设计应用和一些工程计算图表，以便读者能进行实际工程设计。

在理解了谐振开关变换器的工作原理和工作过程后,就比较容易理解有源钳位、全桥移相等软开关技术。因而,本书只介绍了有源钳位、全桥移相软开关技术的工作原理和工作过程,并只给出简单的软开关形成条件的方程式。至于公式推导则不做介绍,可让读者参照串联谐振方面的内容自行推导。

本书也介绍了同步整流、APFC、并联均流等技术,让读者能够了解这些新技术的工作原理及设计方法。

本书第一章,第二章,第四章第一节、第二节、第三节和第七章的内容由张占松老师执笔;第三章,第四章第四节,第五章,第六章,第八章及概论部分的内容由张心益老师执笔。

浙江大学徐德鸿教授在百忙中为本书作了序,在此表示衷心的感谢!

另外,在本书编写过程中,作者采用本书的内容构架,在由北京昂讯公司举办的多次全国各地的短期培训班中讲解这门课程,得到广大学员的好评和肯定。同时,也提出了一些建议,在此一并感谢北京昂讯公司和这些学员。

在本书编写过程中,我们得到了很多同行、老师及朋友们的支持,特别是得到了北京交通大学耿文学老师,清华大学张乃国老师,华南理工大学张波、王志强、丘东元等老师,北京航空航天大学张俊民老师,北方工业大学陈亚爱老师,广州大学杨睿老师,暨南大学陈长缨老师,五邑大学陈鹏老师,广东机电职业技术学院徐月华、万家富老师,广东工业大学谢光汉、唐雄民老师,新进科技有限公司卢伟国、许志亮、黄小炳先生,中兴通讯公司李广勇、胡先红、帅永辉先生,佛山汉毅电脑设备有限公司杨义根先生,广州广日电梯集团配件有限公司罗婉霞女士、张凌云先生,广州金升阳科技有限公司尹向阳先生,电源世界杂志社刘勇先生,广州电器科学研究院张文丽小姐的帮助和指点,在此也向他们表示由衷的感谢。

由于本书编写时间有限,书中内容、见解、叙述难免疏漏,敬请广大读者谅解和指正!

作 者  
2012年7月

# 目 录

序	
前言	
概论	1
第一章 基本开关型变换器主电路拓扑	4
第一节 Buck 变换器	4
一、工作原理	5
二、电路各点的波形	5
三、主要概念与关系式	5
四、稳态特性与元器件参数的量化	11
第二节 Boost 变换器	11
一、工作原理	12
二、电路各点的波形	12
三、主要概念与关系式	13
四、稳态特性分析	17
五、起动过程特性分析	18
第三节 Buck-Boost 变换器	18
一、工作原理	19
二、电路各点的波形	19
三、主要概念与关系式	19
四、优缺点	21
五、拓扑分析反号变换器	21
第四节 Cuk 变换器	23
一、电路构成	23
二、工作原理	23
三、电路各点的波形	24
四、主要概念与关系式	25
第五节 四种基本变换器的比较	27
第二章 变换器中的功率开关器件及其驱动电路	31
第一节 开关功率器件	31
一、垂直式导电的 IGFET (IGBT) 的结构和导电机理	31
二、IGBT 与 IGFET 的不同	32
第二节 IGFET 和 IGBT 的静特性	33
一、电压、电流	33
二、IGFET 和 IGBT 作为硬开关时的开关特性	33
第三节 作为开关使用的二极管	35
一、二极管的转态限制了工作效率 $f_s$ 的提高	35
二、寄生二极管的作用	35

三、几种二极管的比较	35
第四节 功率模块	36
一、IGBT 和 IGFET	36
二、SiCVJFET 功率模块	37
第五节 开关功率器件的驱动	37
一、直接驱动法	37
二、隔离驱动法	38
三、专用芯片高频脉冲调制驱动法	38
四、可饱和电抗器作磁占空比控制法	39
<b>第三章 高频开关电源中的磁性元件设计</b>	<b>40</b>
第一节 磁性材料的基本特性	40
一、磁性材料的基本参数	40
二、磁心的结构	42
三、基本电磁感应定律	43
四、高频磁性元件的损耗	43
第二节 高频变压器的设计方法	47
一、变压器尺寸的确定	48
二、变压器的最优效率	49
三、磁感应强度摆幅的选择	49
四、变压器一次绕组匝数的计算	51
五、变压器二次绕组匝数的计算	51
六、绕组导线的选择	52
七、绕组的排列结构	52
八、安全性能要求对变压器的影响	54
九、漏感对变压器性能的影响	54
第三节 电感的设计方法	55
一、电感器的设计方法	56
二、扼流圈的设计方法	57
第四节 共模电感的设计	61
第五节 新型磁性材料	62
一、铁镍合金	62
二、铁铝合金	63
三、非晶态合金	63
四、微晶合金	63
五、粉心材料	64
<b>第四章 输入与输出隔离的各种变换器结构</b>	<b>66</b>
第一节 变换器供电电源	66
一、概念	66
二、 $V_s$ 的整流、滤波电路元器件计算	66
第二节 反激变换器	69
一、工作原理	69
二、变压器的工作特点与设计分析	72
三、双管反激变换器	73



第三节	正激变换器	73
一、	正激变换器电路组成、工作原理和波形	74
二、	正激变换器的变压器带来的问题	74
三、	技术措施	74
四、	基本关系式	76
第四节	半桥变换器原理与设计	78
一、	半桥变换器的工作原理	78
二、	半桥变换器的优缺点	81
三、	半桥变换器变压器的设计	83
<b>第五章</b>	<b>高频开关变换器的软开关技术</b>	<b>85</b>
第一节	高频开关变换器的损耗	85
第二节	零电流、零电压开关	86
第三节	能量不完全传递的反激变换器的谐振软开关	86
第四节	Boost 变换器谐振软开关	88
第五节	半桥谐振开关变换器	91
一、	RLC 串联谐振基本知识	91
二、	半桥 LLC 串联谐振变换器	95
第六节	有源钳位软开关技术	107
第七节	全桥移相软开关技术	111
一、	电路原理和各工作模态分析	111
二、	全桥移相电路零电压开关形成条件	114
三、	二次侧占空比丢失现象	115
第八节	能量完全传递的反激变换器的谐振软开关	115
<b>第六章</b>	<b>有源功率因数、同步整流、变换器并联技术</b>	<b>118</b>
第一节	有源功率因数校正	118
一、	Boost 变换器有源功率因数校正原理	119
二、	Boost 变换器有源功率校正的电流状态	120
三、	APFC 的控制方式	121
四、	平均电流控制的 APFC 电路	123
五、	单周积分控制的 APFC 电路	124
六、	单周电流比例采样差分控制的 APFC	127
第二节	同步整流技术	130
一、	同步整流原理	131
二、	自驱动同步整流技术	132
三、	辅助绕组驱动同步整流技术	132
四、	有源钳位同步整流技术	133
五、	电压外驱动同步整流技术	134
六、	应用谐振技术的软开关同步整流技术	135
七、	正激有源钳位电路的外驱动软开关同步整流技术	135
第三节	高频开关变换器的并联均流	136
一、	输出阻抗法并联均流技术	137
二、	主/从控制法	138
三、	平均电流自动均流技术	139

四、最大电流法自动均流技术 .....	140
五、热应力自动均流技术 .....	140
<b>第七章 开关电源的闭环控制 .....</b>	<b>142</b>
第一节 开关电源系统的隔离技术 .....	142
一、隔离技术 .....	142
二、系统架构和负反馈 .....	143
第二节 PWM 开关电源的集成电路芯片 .....	143
一、SG3524 电压控制型芯片 .....	143
二、UC3846/3842 电流控制型芯片 .....	145
三、集成控制芯片的发展 .....	147
第三节 状态空间平均法的动态理论和参数 .....	148
一、开关变换器小信号分析 .....	148
第四节 开关电源系统稳定和校正 .....	156
一、开关电源系统的稳定条件 .....	156
二、主要参数相关性 .....	157
第五节 伯德图的测量设备及测量方法 .....	157
一、从开环系统中的某点注入信号的方法 .....	157
二、利用几 Hz 以上的开环伯德图测量方法作出“总开”曲线 .....	158
三、用差分方法确定补偿特性曲线 .....	159
第六节 误差放大器反馈网络参数的确定 .....	160
<b>第八章 高频开关变换器的保护电路 .....</b>	<b>163</b>
第一节 输入浪涌电压 .....	163
一、输入浪涌电压的形成及形式 .....	163
二、输入浪涌电压抑制元器件 .....	164
三、抑制输入浪涌电压的方法 .....	167
第二节 输入浪涌电流 .....	168
一、输入浪涌电流的产生 .....	168
二、输入浪涌电流的抑制方法 .....	170
第三节 输入过电压、过电流的保护 .....	172
第四节 输出过电压、过电流的保护 .....	172
第五节 开关变换器的过热保护 .....	173
第六节 开关变换器电磁干扰的防护 .....	174
一、开关变换器电磁干扰的产生和测定 .....	174
二、开关变换器传导噪声的抑制 .....	175
三、开关变换器辐射噪声的抑制 .....	178
<b>参考文献 .....</b>	<b>185</b>

# 概 论

高频开关变换器是指采用现代电力电子器件（快速肖特基整流二极管、MOS管、IGBT等高速器件），将直流或交流电源调制成高频交变电源的电源转换设备。根据输入、输出的不同可分类为以下几种：

## （1）DC-DC 电源

指输入是直流，输出也是直流的高频开关变换器。此类电源大量的应用于数码电子产品及通信设备。

## （2）DC-AC 电源

指输入是直流，输出是交流的高频开关变换器。不间断电源、后备电源均是 DC-AC 电源的典型应用。

## （3）AC-DC 电源

指输入是交流，输出是直流的高频开关变换器。它的应用最广，几乎所有电子产品均要用到此类电源。

## （4）AC-AC 电源

指输入是交流，输出是频率可变、幅值可变的交流，变频器就是这类 AC-AC 电源的典型产品。照明产品用的电子镇流器也是此类产品。

高频开关变换器的基本类型是 DC-DC 高频变换器，是将直流电源通过高频调制，变换成高频方波交流电源，再将其整流成直流输出。

对于传统的 DC-DC 电源一般是采用串联稳压直流电源，这是一种连续控制的线性稳压电源。之所以称之为线性电源，是因为其调整管工作在线性放大区，整个调整功率全部由调整管承担，其调整管的功耗很大，整个电源设备的效率就比较低，一般在 35% ~ 50% 左右，而且调整管需要用体积很大的散热器去降低调整管的温升。

高频开关变换器的调整管工作于开关状态，其开关频率高达几万赫兹，甚至几十万赫兹，此时开关管的功耗仅是开关时形成的开关损耗和开通时的通态损耗，因而损耗大大降低，效率可达 75% ~ 95%。在高频工作的情况下，变压器、电感等磁性元件得以采用高频铁氧体材料，摒弃了串联稳压电源的低频变压器，因而体积小、重量轻，电源的功率密度得到很大的提高。

电源是组成各种电子设备的最基本部分，每个电子设备均会要求有一个稳定可靠的直流电源来供给设备的各种信号处理电路的直流偏置，以期达到各信号处理电路能稳定可靠的工作。

目前，开关电源变换器以它的高效率、小体积、重量轻等特点，已用来作为电脑、家电、通信设备等现代化用电设备的电源，为世界电子工业产品的小型化，轻型化、集成化作出了很大的贡献。然而，由于开关功率变换器工作在大信号开关状态，其电源的调整率、输出电压纹波、瞬态响应均不如串联稳压电源。在高达几万赫兹的方波工作频率下，很容易形成高次谐波，造成对电源输入线及电源周围设备的电磁干扰。为此，人们又一次将目光聚焦

到如何进一步提高开关变换器的功率密度、转换效率，降低高次谐波、EMI（Eeetro Magnetic Interference，电磁干扰）的问题上。由此出现了采用 LC 谐振工作方式的零电压、零电流开关的电源变换器。零电压、零电流等软开关变换器的出现，去除了开关变换器的开关损耗，大大推动了开关变换器的发展，使得开关变换器的工作频率越来越高。这样开关变换器的磁性元件的体积就变得很小，从而得以采用集成技术将变换器内的所有磁性元件集成在一个磁组件上，形成集成磁性元件，并且在工作频率很高时，输出滤波电容可采用容量和体积比较小的电容，这些都大大提高了开关变换器的功率密度。

在谐振开关变换器中，流过功率开关器件中的电流或加载到功率开关器件上的电压均为正弦波，因而其波形的频谱成分很低，不存在高次谐波的问题，电磁干扰的问题也得到很大程度的改善。另外，由于电压、电流的变化率变得较小，开关功率器件的浪涌电压、浪涌电流也随之变得很小，这又给开关变换器的功率开关器件的可靠工作带来了很大的好处。

在环境问题、能源问题凸显的今天，节能减排、降低温室效应已是人们关心和重视的问题。开关变换器效率较高，有节能的效果。但未来会对开关变换器的效率要求越来越高，尤其是很多电子设备多为长期接在交流电网上，有些采用遥控的设备（如电视机）本身需要有一个电源让遥控接收电路工作。因而就提出了空载损耗的概念，虽然单台设备的空载损耗很小，但大量的设备同时连接到交流电网就不能忽视这些损耗了。

为了解决空载损耗的问题，人们就从控制方式上作了很大的努力，出现间隙、跳频控制等方式，即在开关变换器空载时，控制电路采用间隙工作的方式以减小损耗，同时又检测负载的情况，一旦有负载即刻转入正常工作频率，采用此种方式后，一些设备的空载损耗已能降低到 0.2W 的水平。谐振软开关的应用解决了开关变换器的开关损耗问题，但开关器件由于工艺问题所形成的源-漏极导通电阻、集电极和发射极的饱和导通电压、二极管的导通电压、反向恢复时间均成为开关变换器损耗的主要来源，因而人们在研究开关变换器拓扑结构的同时，也在不断地进行开关用功率器件的研究。

为降低输出整流二极管的功耗，目前已出现采用低损耗二极管的产品。低损耗二极管具有更低的导通电阻。而且，同步整流技术的出现也完全改变了传统的整流方式，使得输出整流损耗得到很大幅度的降低。采用同步整流技术之后，开关变换器的效率一般可提高 5% 左右。

为降低开关功率器件的导通损耗，已研发出 COOLMOS 的新工艺。其特性的变化范围同以前的功率 IGFET 相比有较大改善，在  $V_{ds}$ （耐压）为 600V 的时候，每个单位面积的导通电阻可降低 1/5，因而采用 COOLMOS 的 IGFET 具有更低的开关损耗和导通损耗。

IGBT 的电流密度是 IGFET 的 3 倍，因而用 IGBT 模块是大功率应用的普遍选择。但以往 IGBT 的导通机制则必定会产生关闭 IGBT 时的“拖尾”电流，“拖尾”电流会造成很大的开关损耗，也使 IGBT 的开关工作频率受到限制。WARP 快速型 IGBT 的出现给大功率的开关变换器带来很大的改善，WARP 是以降低 50% 的 IGBT 关断损耗为目标而研究开发的，目前的测试已达到预计目标。目前，WARP 的工作频率已达 180kHz 左右。

现在开关功率变换器因具有较高的效率在人们的日常生活中应用很广，每个家庭都有很多高频功率变换器的应用，如电视机、洗衣机以及照明荧光灯的镇流器均是开关变换技术的应用。因而大量开关功率变换器的使用又对开关功率变换器提出了以下这些更高、更严的要求。

### (1) 研制高效节能高频开关变换器

分成两个发展方向，一是如何更有效地降低开关变换器的控制损耗，二是如何进一步提高现有开关变换器的使用效率。就这两点而言，对开关变换器的拓扑结构、开关功率器件、磁性材料、磁性元件、电容滤波元件等都提出了更为严格的要求，也是目前这个产业要重点研究的课题。

### (2) 开关变换器的小形化、低电压化和大容量化

小形化意指其体积小、功率密度高。随着数字化、信息化社会的到来，各种个人的信息化、数字化产品层出不穷，因而也希望各种电源供应器件也越小越好。这对开关电源变换器的设计也带来很大的冲击，在磁性元件设计、滤波元件的选择、电源产品的散热设计方面均有较高的难度，但短、小、轻、薄是未来的发展方向。

大容量意指功率大，目前高频开关变换器的功率容量还是受到 IGBT、IGFET 的高频开关器件的限制而无法做成兆瓦级的功率变换器，但随着器件的发展，估计未来几年就有可能出现兆瓦级的开关功率变换器。

### (3) 低噪声、低损耗的软开关变换器

零电流、零电压开关变换器能有效降低功率器件的开关损耗、浪涌电压、浪涌电流，因而是一种低损耗、低噪声的开关变换器。但是，如何更可靠、更有效、更优化地设计软开关变换器拓扑、磁性元件结构及参数就成为目前研究的重点。

### (4) 高次谐波及电磁干扰的防护

开关变换器使用越来越广泛，同时也给电力输电网带来了谐波压力的问题。有时单台开关变换器设备的高次谐波符合使用标准，但大量设备同时在同一电力网络上时，其高次谐波就不容忽视，会造成很大的危害。

越来越多无线电频谱的使用，也迫使开关变换器的电磁辐射干扰必须很低，不然会严重干扰无线通信。另外，电磁干扰的辐射抑制要求也会越来越严。

### (5) 新材料、新器件的研发

开关变换器的发展同时也得益于新材料和新器件的发展，因而在大力发展高频开关变换器的同时，也必须大力发展各种高频开关变换器所用的材料和器件，如磁性材料、功率开关器件。散热材料、散热技术的发展均是开关功率变换器发展的重要一环。

# 第一章 基本开关型变换器主电路拓扑

“拓扑”一词由英文单词 topology 音译而来，拓扑一词在此指开关型变换器从“根”上进行分类和分析，包含了电路结构、电路原理及电路的运行模式。分析拓扑原理可以使用能量守恒的概念，而无需死记硬背公式。原理分析中的很多公式是由  $\Delta i$ 、 $\Delta \phi$ 、伏·秒值、安·秒值、安·匝数相等原则推导出来的。从拓扑角度看，开关变换器并不多，本书暂说四种基本的主电路。

无论开关变换器如何演化，均是由基本拓扑发展、变化而来。

变换器（直流-直流变换）主要功能是变电压或变换组别极性，有些为了隔离，要加直流变压器<sup>[1]</sup>。

变换器主要元器件是电感、电容和开关用的晶体管。晶体管周期性地以开通-关断-开通形式工作，频率一般在 20kHz 以上，高的还到几兆赫兹。变换器加上保护环节、其他环节成了高频开关电源。由于频率越高的开关电源，其体积越小、重量越轻、成本也越低，因此人们追求开关高频化。但是，频率过高会带来新的问题。众所周知频率倒数是周期，在一个周期  $T_s$  中包括开通时间  $t_{on}$  和关断时间  $t_{off}$ ， $t_{on}/T_s = D_1$ ，称为开通时间占空比。 $t_{off}/T_s = D_2$ ，称为关断时间占空比。此种状态称为电感电流  $I_L$  连续工作模式。如果在每个周期开始时，电感电流  $I_L$  均从零开始，这种状态称为  $I_L$  不连续工作模式。这时，还会出现第三个占空比  $D_3$ 。这时，除了电容供电流给负载之外，主线路中均无电流（Cuk 除外）。所以，电感电流  $I_L$  连续或不连续是要特别关注的。

本章介绍基本拓扑的各项特征，包括电路、工作原理、波形、主要概念与关系式、特点等。利用拓扑，分析结构、推导公式。电感、电容电流，高频开关时是线性变化的，这不单是为了简化，也符合理论和实际波形。最后用公式列表来比较四种最常用基本变换器的异同。

## 第一节 Buck 变换器

Buck 变换器如图 1-1 所示，又名降压变换器或三端开关型降压稳压器。

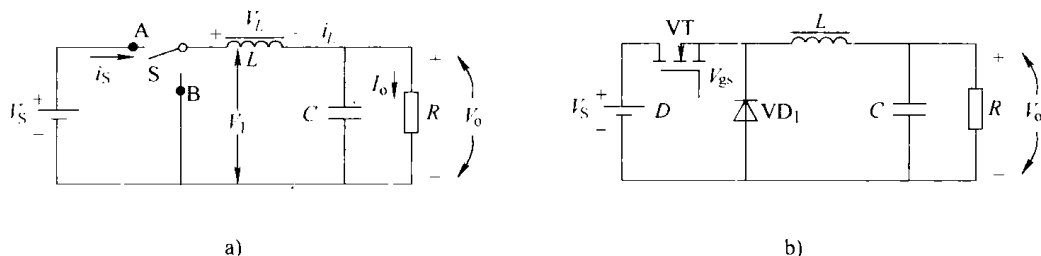


图 1-1 Buck 变换器电路

a) Buck 变换器电路原理图（可以共+端，也可共-端） b) 由场效应晶体管和二极管组成的电路图

图 1-1a 由单刀双掷开关 S、电感元件  $L$  和电容  $C$  组成电路的原理性示意图。图 1-1b 由占空比  $D_1$  工作的有源场效应晶体管 VT、无源开关二极管  $VD_1$ 、电感  $L$ 、电容  $C$  组成， $R$

为电阻性负载。电路实现把直流电压  $V_s$  转换成直流电压  $V_o$  的功能。

### 一、工作原理

为分析稳态特性，简化推导公式的过程，特作以下几点假定：

(1) 场效应晶体管、开关二极管均是理想开关器件。也就是说，它们可以瞬间“导通”和“截止”，而且“导通”时压降为零，“截止”时漏电流为零。

(2) 电感、电容是理想元件。电感工作在线性区而未饱和，寄生电阻为零，电容的等效串联电阻为零。

(3) 输出电压中小的纹波电压与输出电压相比允许忽略。

工作过程如下：

当开关 S 在位置 A，如图 1-2a 所示，假设历时  $t_{on}$  的电流  $i_L$  线性增加， $0 \sim t_{on}$  阶段，电感储能电容充电，二极管  $VD_1$  承受反向电压而截止。当开关 S 转换至位置 B 时，如图 1-2b 所示。由于  $L$  中电流不能瞬变，产生电磁感应的电动势即极性反向，电感放能使  $VD_1$  正偏而导通起续流作用，也起钳位作用，使电感左端钳位为负，负载  $R$  两端电压仍是上正下负。在负载  $R$  上流过平均电流  $I_o$ ， $R$  两端电压  $V_o$ ，极性上正下负。 $t_{off}$  阶段，电容处在放电状态，有利于维持  $V_o$  不变。

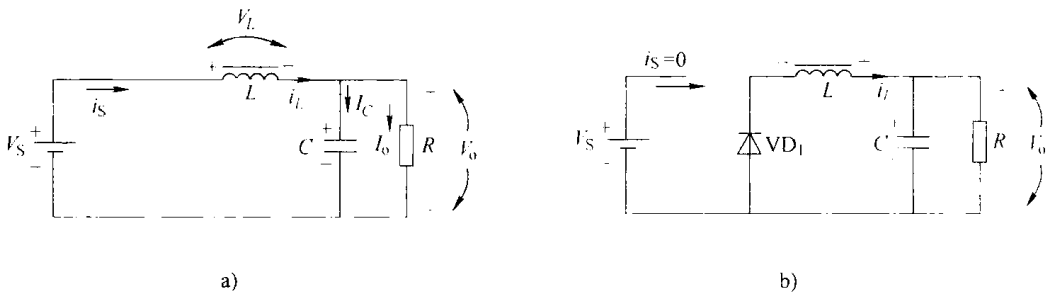


图 1-2 在周期  $T_s$  中 Buck 变换器随  $t_{on}$  和  $t_{off}$  在两个电路中先后工作

a) 开关 S 在位置 A b) 开关 S 在位置 B

### 二、电路各点的波形

在周期  $T_s$  中，电感电流  $i_L$  是关键物理量，可分为电感电流连续工作模式和电感电流不连续工作模式两种。波形如图 1-3a、b 所示。在电感  $L$  上有直流电压  $V$  作用时，电流变化率为  $r$ 。

依据法拉第定律  $\frac{V}{L} = \frac{\Delta i}{\Delta t} = r$ ，当开关 S 闭合  $D_1 T_s$  时间段， $i_L$  以斜率  $(V_s - V_o) / L$  上升。当开关 S 打开时， $i_L$  以斜率  $V_o / L$  下降，故输入电流阶梯斜坡  $i_s$  是脉动的，斜坡中点值是输出电流  $I_o$ ，在  $L$ 、 $C$  作用下它是连续、平稳的直流电流。当负载  $R$  变化时， $I_o$  成反比变化，即  $R$  上升  $I_o$  下降，所以称它为恒压源。

由图可知，电流增量  $\Delta i = r \Delta t$ ，即  $\Delta i$  随  $\Delta t$  而变。控制占空比就控制了开关电源的输出  $V_o$ 。

### 三、主要概念与关系式

在静态工作下可进行以下分析。

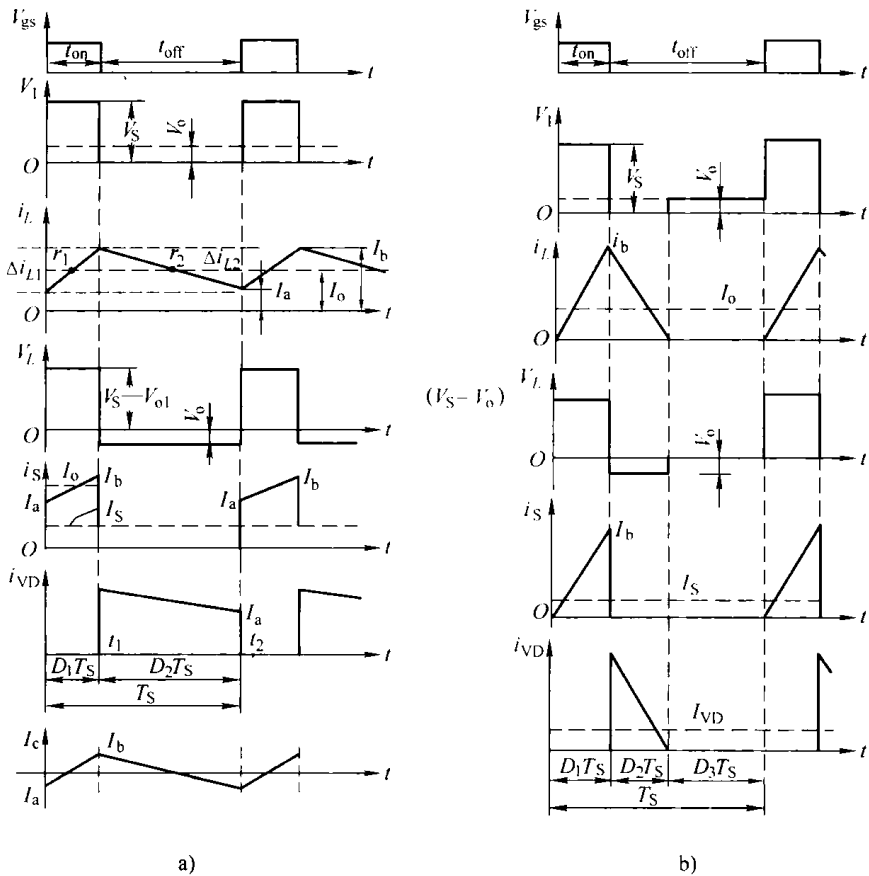


图 1-3 Buck 变换器两种工作模式波形图

a) 连续模式 (在一个周期中  $I_L > 0$ ) b) 不连续模式 (在一个周期中  $I_L$  有零值点)

注:  $r_1$ 、 $r_2$  是电流变化率,  $I_a$  是最小幅值,  $I_b$  是最大幅值。

## 1. 电压增益与占空比关系

### (1) 电感电流连续工作状态

下面分析一下开关闭合和断开与输出电压的关系。在图 1-3 中, 设开关周期为  $T_s$ , 其中闭合时间为  $t_{on} = D_1 T_s$ , 断开时间为  $t_{off} = D_2 T_s$ 。  $D_1$  称为开通时间占空比, 表示有源开关接通时间占周期的百分值。  $D_2$  称为关断时间占空比, 表示有源开关关断时间 (即无源开关  $VD_1$  导通时间) 占周期的百分值。根据假定 (1), 很明显,  $D_1 + D_2 = 1$ 。

在输入、输出电压不变的前提下, 当开关  $S$  在位置  $A$  时, 对应  $D_1 T_s$  区间各量波形如图 1-3a 所示, 加在电感两端电压为  $V_s - V_o$ , 而把  $V_L \cdot D_1 T_s$  称为伏·秒值。

当开关  $S$  在位置  $B$  时有对应  $D_2 T_s$  波形同理, 对应  $D_2 T_s$ , 加在电感两端电压为  $V_o$ , 而把  $V_o \cdot D_2 T_s$  也称为伏·秒值。一周期储能等于放能有伏·秒值相等的原则, 并依假定晶体管、二极管能立即转换导通、关断有  $D_2 = 1 - D_1$ , 则

$$(V_s - V_o) D_1 T_s = V_o D_2 T_s$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D_1 \quad (1-1)$$

式 (1-1) 表明, 输出电压  $V_o$  与  $V_s$  相关并随占空比  $D_1$  而变化。  $\frac{V_o}{V_s}$  是电压增益, 用  $M$  表示,



即  $M = D_1 < 1$ ，是降压关系。

$$\text{关注电感电流 } i_L \text{ 的线性上升, 根据 } V = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}, \text{ 在稳态下 } \Delta i_{L1} = \frac{V_s - V_o}{L} D_1 T_s \quad (1-2)$$

$$\text{又} \quad \Delta i_{L2} = -\frac{V_o}{L} D_2 T_s \quad (1-3)$$

依据  $|\Delta i_{L1}| = |\Delta i_{L2}|$  原则也有  
推出式 (1-1)。

如图 1-4 所示, 电压增益  $M$  由开关开通时间占空比  $D_1$  决定, 与负载电流大小无关, 即变换器有很好的外特性和调节特性。

(2) 电感电流不连续工作状态

在  $V_s$  一定,  $D_1$  一定时

当电感  $L$  较小, 或负载电阻较大或  $T_s$  较大时, 将出现  $i_L$  已下降到 0, 新的周期却尚未开始的情况。当新的周期来到时,  $i_L$  从 0 开始线性增加。这种工作方式称电感电流不连续状态。波形图如图 1-3b 所示。此时, 当开关 S 在位置 A 时, 有式 (1-2)。当开关 S 在位置 B 时, 有式 (1-3)。

由于  $|\Delta i_{L1}| = |\Delta i_{L2}|$

整理得

$$V_o = \frac{D_1}{D_1 + D_2} V_s, \quad M = \frac{D_1}{D_1 + D_2} \quad (1-4)$$

式中  $D_2$ ——晶体管关断、二极管开通时间占空比。

注意, 此时  $D_1 + D_2 + D_3 = 1$ , 如图 1-3b 所示, 即存在  $D_3 T_s$  区间,  $V_L$  在  $D_3 T_s$  时有  $V_o$  值。

由图 1-3b 中  $i_L$  曲线可知, 稳态负载电流  $I_o$  即是  $i_L$  面积在  $T_s$  时间内的平均值, 而且等于  $V_o/R$ 。即

$$I_o = \frac{1}{T_s} \left[ \frac{1}{2} (D_1 + D_2) T_s \frac{V_s - V_o}{L} D_1 T_s \right] = \frac{V_o}{R} \quad (1-5)$$

解得

$$\frac{1}{M} - 1 = \frac{2\tau_L}{D_1 (D_1 + D_2)} \quad (1-6)$$

式中  $\tau_L = \frac{L}{RT_s}$ 。  $\tau_L$  是无量纲参数。它是变换器特征值之一, 它是  $\frac{L}{R}$  (称为时间常数), 再与  $T_s$  相比, 故称为相对时间常数。

由式 (1-6) 可得

$$M = \frac{D_1}{D_1 + \frac{2\tau_L}{D_1 + D_2}} \quad (1-7)$$

由式 (1-4) 和式 (1-7) 联解得

$$D_2 = \frac{D_1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8\tau_L}{D_1^2}} - 1 \right) \quad (1-8)$$

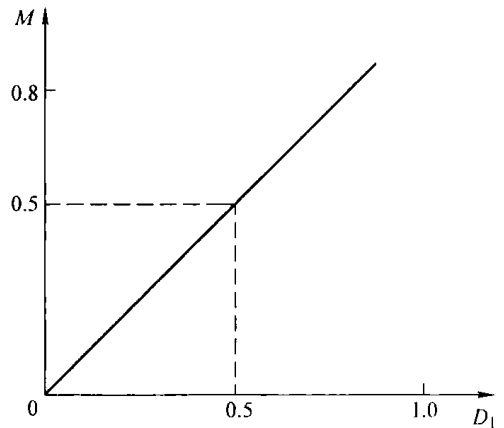


图 1-4 Buck 变换器  $M = f(D)$