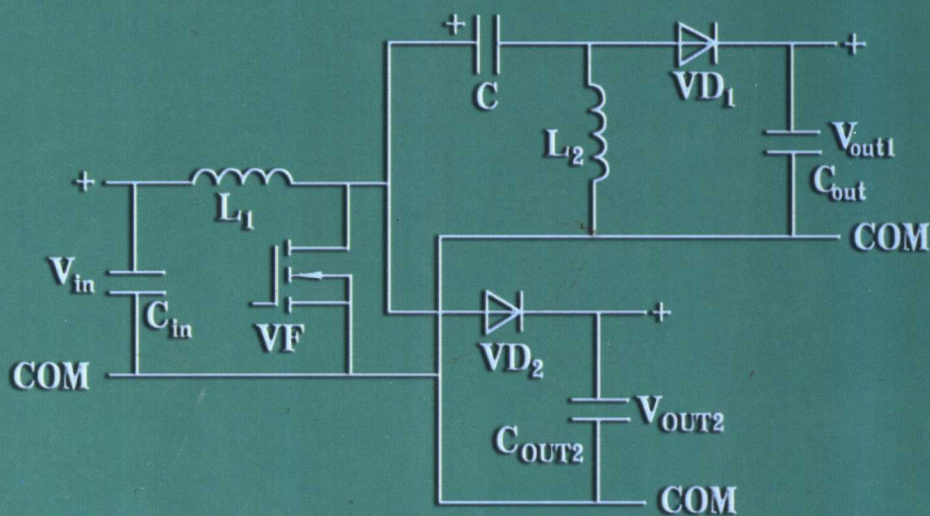


电能变换技术丛书

单管变换器及其应用

陈永真 宁武 孟丽因 编著



电能变换技术丛书

单管变换器及其应用

陈永真 宁 武 孟丽囡 编著



机械工业出版社

将一种直流电能转换成所需要的直流电能或交流电能的装置通常被称为功率变换器,其电路拓扑结构多种多样。单管变换器以其控制方式和电路简单、可靠性高而得到广泛应用。

本书就如何理解与更好地设计单管变换器做了详尽的论述,本书的第1章详尽地论述了单管变换器的基本知识、基本变换器演化出的各种电路;第2章为基本电路单元的设计与选择;第3章为缓冲电路问题;第4章为隔离型变换器的设计实例;第5章为隔离型谐振型变换器与有源钳位变换器的设计;第6章为非隔离型单管变换器的设计与应用;第7章为单管变换器的变压器设计。

本书的读者对象主要为电气及电子工程师、科研人员,电类各专业以及及与电容器相关的高校学生和教师。

图书在版编目(CIP)数据

单管变换器及其应用/陈永真,宁武,孟丽因编著. —北京:
机械工业出版社, 2006.1

(电能变换技术丛书)

ISBN 7-111-18201-4

I. 单... II. ①陈...②宁...③孟... III. 变换器
IV. TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第154432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 玫

封面设计:陈 沛 责任印制:杨 曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2006年4月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·13.25 印张·323千字

0001—4000册

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话:(010) 68326294

编辑热线:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

电能变换技术丛书

编辑委员会

主任：蔡宣三

副主任：严仰光 牛新国 倪本来

委员：牛新国 王 玫 王 聪 毛三可

艾多文 刘凤君 刘胜利 严仰光

何湘宁 张卫平 张 立 张占松

张志国 李厚福 杨继深 沙 斐

陆 鸣 陈 坚 陈永真 陈建业

陈道炼 区健昌 赵良炳 侯振程

倪本来 倪海东 徐德鸿 崔鼎新

黄济青 龚绍文 路秋生 蔡宣三

执行主编：倪本来

序

电能是当今最重要的能源形式。很难想象失去电能支撑的文明世界如何运行。在所有的动力资源中，电能使用最方便，适用范围非常广，并且是清洁的。电能变换则是用电之门，是用好电的必由之路。

供人类使用的电能都是通过一些方法生产或收集得来的。世界上绝大部分的电能来自发电站，例如水电站、火力发电厂和核电站，发电站是交流电网的源头。燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充。风力发电、潮汐发电等是自然能与电能之间的有效转换。太阳能电池是太空最理想的发电装置。燃料电池、锂离子电池、镍氢电池、镍镉电池、铅酸蓄电池等是经过电化学反应而产生电能的固定或移动式电能载体。形形色色的干电池是一次性的微小电能载体。所有称得上“电池”的都是直流电的储蓄体。

直接从电网或电池汲取的原生态的电能（姑且称之为原电）在某种意义上都是“粗电”。在大多数情况下，使用这些“粗电”都不能尽如人意，譬如电网上的电就不一定好使。电网是共用的，宏观上有高峰期和低谷期之分，电网在高峰期和低谷期的电压存在差异；由于不同用户从电网支取电能的时机和电量的不确定性和偶然性，特别是大型设备的起动和停止，足以给邻近电网造成随机的瞬时冲击和定式落差；由于雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等，都将给敏感用户带来麻烦：设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱，严重时还将造成系统硬件损坏，使系统工作陷于瘫痪。为此需要稳压器和 UPS 对电网下载的粗电进行整合和修补。

由于电池自身具有的电容性，电压瞬时波动可能比电网要小。不过电池在工作中也问题不少，最常见的是电池电量随工作时间的延长或用电量的加大会逐渐衰竭；另外，电池单体的电压较低，很少以其自然形态直接拿来使用，多数是串联或串并联组合，但很难保证串联或串并联组合中的每个单体的特性一致。为此，必须实施合理的充电、放电和监控。

太阳能电池用来将阳光转换成电能，但阳光的照射会因向背、阴晴、昼夜、四季而不均衡，为此，需要对转换的电能进行收集储存，再经 DC/DC 或 DC/AC 变换，获得稳定的直流电和交流电；风力等自然能发电同样受自然因素牵制，借助风力等自然力传动的发电机输出的电力经常处于不稳定状态，也必须实行调整控制。

不管是电网、电池还是相对独立的供电系统，都存在电磁环境问题。即在运行中因环境电磁干扰（如雷电、汽车点火引发），或共享电源母线的“惹事”负载设备的电磁干扰，或 DC/DC、DC/AC 变换装置自身的电磁干扰，都能搅得“四邻不安”。

今天的电网面临的承载非常严酷。由于功率半导体开关器件的长足进步、控制技术日益先进，变流设备的功率等级提升极快；又由于采用变流举措的负载设备日益增多，其复杂的负载性质带来的负面影响突出。基于这些因素的电网存在功率因数低下、波形畸变、浪涌、相位丢失等不良境况。因此，电能质量控制刻不容缓，电力补偿、有源滤波、柔性输配电等电能变换技术在电网和用户之间能起到较佳的缓冲匹配作用。

能源问题在本世纪仍占据瞩目位置,人们追求在节约电能方面有卓越贡献的高效能供电设备和用电方法。在现实中,相当一部分电能消费是以驱动电动机的形式进行的,如机床、电动工具、电动汽车、城市轻轨、传动系统、机器人、风机、水泵、纺机、空调等等。直接用粗放的原电驱动,免不了要引入串联阻抗或并联阻抗,以控制和调节电动机的运行状态,而这些不得已介入的阻抗会白白消耗电能。为了将这些浪费掉的非常可观的电能拣回来,利用现代电能变换技术对电动机实行变频调速控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电的20%,节电潜力巨大,起源于欧美的绿色照明浪潮大有席卷全球之势。绿色照明的主题词:最小耗电产生最大流明。除了新型电光源和新型发光介质外,以全新的电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的主要角色。

生产力越发展,技术越进步,环境问题越加突出。电能的生产、变换、使用在很大程度上影响到环境。电能的生产一般伴随二氧化碳、二氧化硫气体排放,前者是地球温室效应的参与者,后者是酸雨的成因,两者对环境危害都很大。少一点电能生产却能换得环境少一点恶化。生产发展必然要增加电力的需求,关键在于节约电力,减少电力的浪费。这要求我们的电源装置、电能变换系统提高效率。另外,干净的电磁环境也要求电能变换设备在电磁兼容性方面达标。节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电势在必行。

21世纪将是科学技术突飞猛进的时代,技术进步定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。“电能变换技术丛书”在这一时刻呈献给读者,意在诠释电能变换技术的最新应用。但是电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容异常丰富,丛书限于规模实难尽述。不过,我们仍然企望借助几个具有典型意义的层面,如高频功率变换、变频传动、电能质量控制等在学术、产业都呈热点的几个方面展示多彩的电能变换技术应用。丛书主要供中等技术水平的科技人员阅读,在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员。丛书的读者定位为电源技术、运动控制、电力电子、电子技术、信息技术、能源转换、过程控制等应用领域的工程技术人员,以及科技爱好者们。读者如能从“电能变换技术丛书”中得到启示,并能在自己的工作实践中获得应用,编者将足以自慰。本丛书从立意到选题到写作内容,定有不足之处,欢迎读者批评斧正。

“电能变换技术丛书”编辑委员会

前言

将一种直流电能转换成所需要的直流电能或交流电能的装置通常被称为功率变换器，其电路拓扑结构多种多样。单管变换器以其控制方式和电路简单、可靠性高而得到广泛应用。

单管变换器可以构成基本变换器，尽管有的文献说基本变换器有六种（Buck、Boost、Flyback、Cuk、SEPIC、Zet）。但是实际上基本变换器只有三种，即降压型变换器（英文缩写为 Buck）、升压型变换器（英文缩写为 Boost）和反极性变换器（也可以称为反激式变换器，英文缩写为 Flyback），其他的电路均可以通过基本变换器的演化与组合得到。通过分析与推演，前面提到的 Cuk 变换器实际上是升压型变换器与降压型变换器的组合，SEPIC 是升压型变换器与反激式变换器的组合，而 Zet 变换器则是反激式变换器与降压型变换器的组合。这样，Cuk、SEPIC、Zet 就不应该列为基本变换器。不仅如此，各种非隔离的变换器（如升压型级联、反激式级联、反激式与降压型级联）以及各种隔离型变换器都可以通过演化的方式从基本变换器的演化中得到。这样做不仅可以使变换器的理论大大简化，而且也使得电路分析简化了。

设计一个性能优异的单管变换器，需要清楚了解各种单管变换器的原理和特性，根据预期的电路的性能指标，正确地选择变换器的电路拓扑。这样做可以避免因电路性能所限而使样机达不到预期的指标。

除了正确地选择变换器的电路拓扑，还要正确地选择相关的元器件。元器件是影响整机性能的另一个关键，不仅要正确地选择有源器件，更要正确地选择无源器件，特别是电容器和电感。

不同的控制方式也会得到不同的性能和经济指标，因此，还要针对要求选择恰当的控制方式。

本书详尽地分析和推演了基本变换器原理和由基本变换器演化而得到的各种级联变换器、隔离变换器以及双向变换器和 LED 驱动器，为后面的各类单管变换器的原理、分析及其设计打下了理论基础；论述了主要元器件的选择与选择依据，缓冲电路的作用与原理，RC-D 缓冲电路及电压瞬变二极管缓冲钳位的作用与设计，RC-D 缓冲电路及电压瞬变二极管缓冲钳位的能量损耗对变换器效率的影响，如何获得无源无损耗缓冲电路的思路，几种无源无损耗缓冲电路原理以及如何实现和设计方法，各类隔离型单管变换器原理、电路结构与细节，主要元件的选择与设计、调试要点，TOP Switch 的应用要点，应用 UC3842 控制芯片的单管变换器、双管钳位变换器、极宽输入电压范围的开关稳压电源，自激型反激式变换器的设计实例，准谐振单管变换器的基本设计方法，如由 IRIS4015 构成的准谐振反激式变换器的原理与设计方法及实例，由 MA8000 系列构成的单管反激式变换器的原理与设计方法及实例，用 UC3842 构成的准谐振反激式变换器的原理与设计方法及实例，开关电源并联的方法与并联后对性能指标的影响，最常见的非隔离型变换器芯片的原理和应用以及注意事项，如 MC34063 的原理与设计方法及其应用实例，由早期 L 系列芯片构成的降压型变换

器的原理与设计方法及其应用实例，改进后的 L496X 系列芯片的原理与设计方法及其应用实例，应用 MOSFET 作为开关管的 L497X 原理与设计方法及其应用实例，电路最简洁的 LM2575/2576/2577 芯片的原理与设计方法及其应用实例，变压器的设计、变压器的结构对变压器的性能影响，电流断续和电流连续状态下的反激式变换器的变压器的设计，正激变换器变压器的设计，如何正确快捷的选择变压器磁心。

作者希望通过本书能对读者在各类单管变换器的设计方面有实质性的帮助，对初学者在单管变换器的原理与设计方面的入门能够起到很好的引导作用，这是作者的最大愿望。

本书的编著过程中，得到了山西永明电源有限公司的张志伟工程师的大力支持，在此深表感谢！

本书得到了电源技术的前辈们的关怀与支持，在此作者对这些前辈们的支持深表感谢！

作者

2005 年 7 月

目 录

序

前言

第1章 单管变换器的基本知识 1

1.1 基本 DC/DC 变换器的电路 运行原理与电磁能量转换 原理 1

1.1.1 Buck 变换器 1

1.1.2 Boost 变换器 5

1.1.3 Invertor(Flyback)变换器 8

1.2 基本变换器的演化 10

1.2.1 基本变换器的等效变换 10

1.2.2 由基本 DC/DC 变换器演化 为级联变换器 11

1.2.3 级联为 Cuk 变换器 12

1.2.4 级联为 SEPIC 变换器 14

1.2.5 级联为 Zet 变换器 16

1.2.6 Flyback 变换器的级联 17

1.2.7 Boost 变换器的级联 18

1.2.8 Flyback 与 Buck 变换器的级 联 19

1.3 基本 DC/DC 变换器向隔离 型的演化 21

1.3.1 基本 DC/DC 变换器向隔离 型 DC-DC 变换器演化的规 则 21

1.3.2 Buck 变换器的隔离型演化 22

1.3.3 Boost 变换器的隔离型演化 ... 26

1.3.4 Flyback 变换器的隔离型演 化 28

1.3.5 Flyback 变换器级联的隔离 型演化 29

1.3.6 Flyback+Buck 变换器级联 的隔离型演化 29

1.4 双向变换器的演化 29

1.4.1 Buck 变换器的电能双向传输 演化 29

1.4.2 Flyback 变换器与其他电路 拓扑变换器的电能双向传输 演化 31

1.5 基本变换器的特殊演化 32

1.5.1 单开关多输出的演化 32

1.5.2 变换器的变形演化 35

第2章 基本电路单元的设计与选 择 39

2.1 交流输入回路的设计与选 择 39

2.1.1 浪涌电流抑制电路 39

2.1.2 电源滤波器 40

2.1.3 整流器的选择 43

2.1.4 滤波电容器的选择 44

2.1.5 一般铝电解电容器可以承受 的纹波电流和可能出现的实 际纹波电流 45

2.1.6 直流输入回路的选择 46

2.2 主开关与控制回路的选择 49

2.2.1 主开关的选择 49

2.2.2 主开关管额定电压的选择 50

2.3 开关电源输出回路元件的 选择 50

2.3.1 输出滤波电容器 50

2.3.2 输出整流器的选择 57

第3章 缓冲电路问题 59

3.1 缓冲电路的作用及原理 59

3.1.1 问题的提出 59

3.1.2 缓冲电路原理 60

3.1.3 开关管应力的转移 61

3.2 RC-D 缓冲电路设计 62

3.2.1 Boost 型缓冲电路的设计	62	4.3.4 功率变压器的设计	92
3.2.2 Flyback 型缓冲电路的设计 ...	62	4.3.5 输出电感设计	95
3.3 开关损耗问题	63	4.3.6 栅极驱动电路	95
3.4 无源无损耗缓冲电路	63	4.3.7 输出电压尖峰的减小	96
3.4.1 单管无源无损耗缓冲电路		4.3.8 缓冲电路	97
(一)	64	4.3.9 输出整流滤波电容器	97
3.4.2 单管无源无损耗缓冲电路		4.3.10 控制回路设计	97
(二)	66	4.3.11 性能分析	99
3.4.3 双管钳位无源无损耗缓冲		4.3.12 双管钳位反激式变换器	101
电路	68	4.3.13 用 UC3842 控制双管钳位	
3.5 单端反激式变换器的准谐振		反激式变换器	103
工作方式	73	4.4 极宽输入电压范围的开关稳	
3.5.1 准谐振工作原理	73	压电源	103
3.5.2 缓冲电容电压极小值的检		4.4.1 问题的提出	103
测	75	4.4.2 解决方案 1	104
3.6 有源钳位	76	4.4.3 方案 2: 单管变换方式	107
3.6.1 有源钳位电路	76	4.4.4 更宽输入电压范围的单管变	
3.6.2 稳态分析	77	换器设计	110
第 4 章 隔离型变换器的设计实例 ...	79	4.5 自激型反激式变换器的设	
4.1 TOPSwitch 的应用要点	79	计	112
4.1.1 不要迷信 TOPSwitch 的指		4.5.1 自激型反激式变换器的基本	
标	79	原理	113
4.1.2 为什么用 TOPSwitch 制作的		4.5.2 开关性能的改善	115
开关电源的输出电压尖峰很		4.5.3 如何实现稳压	116
小	79	4.5.4 开关管最大集电极电流的	
4.1.3 用 TOPSwitch 能制作正激开		限制	117
关电源吗	80	4.5.5 主开关管采用 MOSFET 的	
4.1.4 TOPSwitch - GX 系列的特点		自激型变换器	118
与应用	80	4.5.6 变压器一次电感与开关频	
4.2 应用 UC3842 控制芯片的		率	119
单管变换器设计	83	4.5.7 自激型变换器变压器的设	
4.2.1 UC3842 系列的一般特性	84	计	119
4.2.2 UC3842 的工作状态分析	84	4.5.8 无源无损耗缓冲电路与准谐	
4.2.3 UC3842 的其他性能	86	振工作方式的实现	120
4.2.4 UC3842 最常见的应用方式 ...	87	第 5 章 隔离型谐振型变换器与有	
4.3 双管钳位变换器	90	源钳位变换器的设计	122
4.3.1 总体设计	90	5.1 由 IRIS4015 构成的准谐振	
4.3.2 相关的设计公式	91	反激式变换器的原理与设	
4.3.3 控制用集成电路的选择	92	计	122

5.1.1 电路的启动	122	6.1 MC34063 的应用	152
5.1.2 限流工作方式	123	6.1.1 MC34063 内部工作原理	153
5.1.3 电压反馈模式	124	6.1.2 MC34063 应用电路的基本设计方法	154
5.1.4 准谐振工作方式	124	6.1.3 MC34063 的应用实例	154
5.1.5 轻载工作条件的改善	126	6.2 由早期 L 系列芯片构成的降压型变换器	159
5.1.6 变压器的设计	126	6.2.1 L296 开关式功率稳压器	160
5.1.7 实用电路及测试数据	128	6.2.2 工作原理	161
5.1.8 应用电路	132	6.2.3 应用线路的基本设计方法	167
5.2 由 MA8000 系列构成的单管反激式变换器的原理与设计	135	6.3 L496X 系列芯片的应用	168
5.2.1 准谐振工作方式时需要注意的问题	135	6.3.1 L4960 的应用	169
5.2.2 MA8000 的原理说明	136	6.3.2 L4962 的应用	170
5.2.3 MA8000 的基本应用	136	6.3.3 L4963 的应用	172
5.2.4 MA8000 的应用设计步骤	138	6.3.4 L4964 的应用	173
5.3 有源钳位正向变换器的分析与设计	143	6.4 L497X 的应用	174
5.3.1 设计考虑	143	6.4.1 L4970 的应用	174
5.3.2 电源瞬变与负载瞬变	143	6.4.2 L4971 的应用	178
5.3.3 最大占空比	143	6.4.3 其他 L497X 的应用	179
5.3.4 两个开关之间的延迟时间	144	6.5 LM2575/2576/2577 芯片的应用	183
5.3.5 变压器的设计考虑	144	第 7 章 变压器的设计	188
5.3.6 应用电路实例	144	7.1 变压器的结构	188
5.3.7 用 UC3842 实现有源钳位正向变换器应用电路	145	7.1.1 变压器的结构对变压器性能的影响	188
5.3.8 有源钳位反激式变换器应用电路	146	7.2 反激式变换器变压器的设计	190
5.4 开关电源的功率合成	146	7.2.1 电流断续型变压器的设计	190
5.4.1 最大输出能力自限	148	7.2.2 电流连续/断续时变压器的设计	191
5.4.2 功率分配	149	7.3 正激式变换器变压器的设计	193
5.4.3 时钟与尖峰	150	7.4 变压器磁心的选择	193
5.4.4 可靠性	151	参考文献	198
第 6 章 非隔离型单管变换器的应用	152		

第 1 章 单管变换器的基本知识

DC/DC 变换器随着现代电力电子技术的发展而不断进步，但其电路的基本形式和基本工作原理是相同的，都是在一些电路的基本形式和基本工作原理的基础上通过不同的形式的组合、变异演化而得出的各种满足不同性能要求的新型 DC/DC 变换器，而基本的 DC/DC 变换器是由一个开关管和二极管、电感、电容构成的最简单的单管变换器。

DC/DC 基本变换器实际只有三种基本形式，即 Buck、Boost、Invertor（或称 Fly-back）。其余的变换器形式均在这几种基本 DC/DC 变换器的基础上演化而得。例如级联变换器就是在这几种基本 DC/DC 变换器的基础上演化而得到的（如 Cuk、SEPIC、Zet、Fly-back 的级联，Flyback 与 Buck 的级联、Boost 的级联），另外还有隔离型变换器（如隔离型反激式变换器和正激式变换器的单管 RC-D 钳位、单管钳位、绕组钳位、双管钳位，桥式变换器的半桥变换器、全桥变换器和推挽变换器等）和能量双向传输变换器等。因此，只要弄清楚这几种基本变换器的工作原理，就可以在这几种基本 DC/DC 变换器的基础上，通过“演化”的思路得到其他拓扑形式的变换器，也可以在这几种基本变换器工作原理的基础上，通过不同形式的组合，变异演化出满足各种不同性能要求的新型 DC/DC 变换器。

为此需要弄清楚如下问题：基本变换器的基本工作原理及特征、基本变换器的等效变换、基本变换器的演化思路等。

1.1 基本 DC/DC 变换器的电路运行原理与电磁能量转换原理

AC 电压变换是通过变压器（Transformer）实现的。转换原理是交变电场产生交变磁场和其相反过程，即： $e = -Nd\Phi/dt$ ，无论是电生磁还是磁生电，均符合这一原理。在 DC 变换器中，如果还延用上述原理就会发现，虽然在变压器的一次侧能够产生磁通 Φ ，但 $e = \text{const}$ （恒定不变）所产生的磁通 Φ 是恒定的，即 $d\Phi/dt = 0$ ，所以在二次侧的感生电动势 $e = 0$ ，因此从工作原理上说明了普通变压器不能用于 DC/DC 变换器。

不仅如此，在一种形式的交流电（频率、波形）向另一种形式的交流电（频率、波形）转换时，也不能简单地利用变压器来实现。因此，有必要研究能按要求将一种电能形式转换为另一种电能形式的变换器——基本变换器。

1.1.1 Buck 变换器

1. 基本思路 首先从 DC/DC 变换入手分析，得出结论后再推广到任意电能变换的方式上。由高等数学和电路知识得知：非同频电压、电流相乘，所得一个周期的功率为零，在直流电中，只有频率为零的直流成分做功，因此，衡量直流电的电压、电流的大小，无一例外地用平均值。由于直流电中是以平均值来表达其电流、电压及其做功的功率的，因而改变电压或电流的平均值，即改变了直流电压或电流的因果关系，通常采用改变电压的平均值。改

变电压平均值的方法是：将 DC 有规律地切掉一部分，就可改变直流电压平均值，如图 1-1 所示。

其中阴影部分为保留部分，非阴影部分为切除部分。其阴影部分的平均值为

$$\begin{aligned} V_{\text{out(av)}} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{\text{in}}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{on}}} V_{\text{in}} dt \\ &= \frac{t_{\text{on}}}{T} V_{\text{in}} = D V_{\text{in}} \quad (1-1) \end{aligned}$$

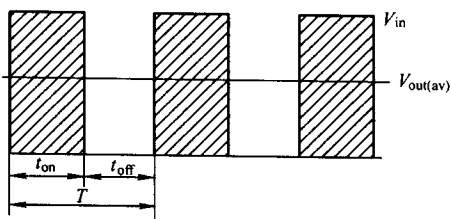


图 1-1 直流斩波降压原理

当 V_{in} 被有规律的部分切除后，输出电压平均值随切除部分的变化而变化。若令保留部分持续时间为 t_{on} ，切除部分为 t_{off} ，开关周期为 T ，输入电压为 V_{in} ，输出电压为 V_{out} 。欲实现这一功能，可在输入、输出间接一个开关，令开关按图 1-1 中描述的规律开关，电路示意图如图 1-2 所示。在图 1-2 所示电路的输出端可以获得比输入电压值低的输出电压平均值。但是这时输出电压是脉动的，含有非常丰富的交流分量，不能直接应用，需将脉动成分去掉。最简单的去掉脉动成分的办法是在开关后面接一低通滤波器（通常称为滤波电路，电路框图如图 1-3 所示。在功率变换应用中，选择低通滤波器应注意的是，电能通过低通滤波器时，为保证效率，不应有损耗。因而 RC 型低通滤波器在这里不能应用，只能应用 LC 型低通滤波器。电路如图 1-4 所示。由于低通滤波器前面是开关，在开关断开时会将电感的电流通路破坏。由于电感上的电流不能跃变，电感上将产生感生电动势 $e = L di/dt$ 强迫外界产生电流通路，这是在实际应用中所不允许的。因而需要在开关断开期间给电感以续流通路，同时又不能将输入短路。由于电路工作时电感上的电流是单向的，输入、续流通路的电流均为单向的，因此续流通路可以是二极管电路，如图 1-5 所示，将图 1-2 与图 1-5 组合可以得到图 1-6，图 1-7 是图 1-6 的实际电路，图 1-8 为图 1-7 电路的主要工作波形。

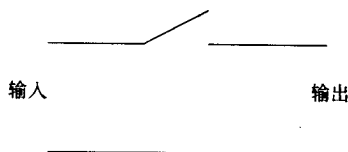


图 1-2 开关斩波电路示意图

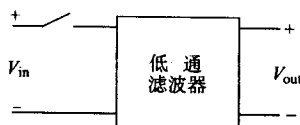


图 1-3 低通滤波器

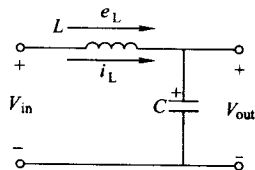


图 1-4 低通滤波器

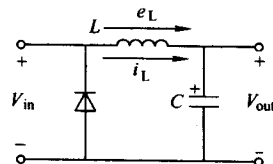


图 1-5 带有续流二极管的低通滤波器

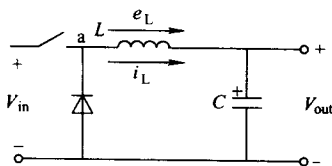


图 1-6 图 1-4 与图 1-5 的组合

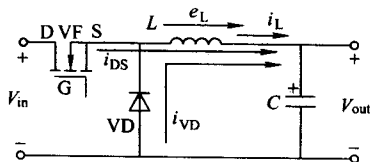


图 1-7 Buck 变换器的主电路

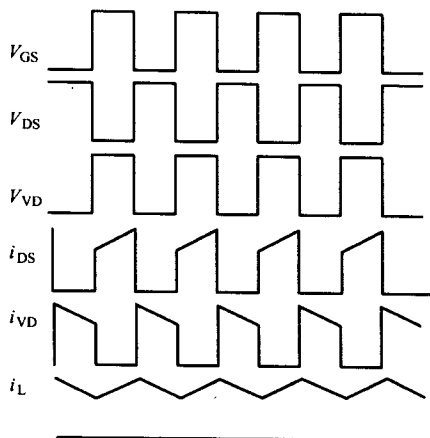


图 1-8 图 1-7 Buck 电路的主要工作波形

2. 电路运行原理与电磁能量转换原理 开关管导通期间：等效电路如图 1-9 所示，开关管将输入电压传输到 a 点，使续流二极管因阳极电压反向而关断，电路的电压平衡方程式为

$$V_{in} = V_{out} + L \frac{di}{dt} \quad (1-2)$$

由于从输入到输出仅有一条支路，由功率守恒（能量守恒）原理，得

$$P_{out} = V_{in} i = \left(V_{out} + L \frac{di}{dt} \right) i = V_{out} i + L \frac{di}{dt} i \quad (1-3)$$

由式 (1-2) 可知，由于 $V_{in} > V_{out}$ ， L 为正常数，则 $di/dt > 0$ ， $i_L \uparrow$ ，并且输入功率大于输出功率，输入功率中大于输出功率的多余部分被低通滤波器中的电感吸收，将电能转化为磁能，以磁场方式存储在磁路中，电感储能增加。

3. 开关管关断期间 由于电感电流不能跃变，电感将产生感生电压，反抗外电路的断开，以寻求导电通路，这时续流二极管导通，开关管电压为输入电源电压，电感电流经续流二极管、负载形成新的回路，输出级的低通滤波器输入电压为零，电感向负载释放储能，其等效电路如图 1-10 所示，电路的电压平衡方程式为

$$0 = V_{out} + L \frac{di}{dt} \quad (1-4)$$

$$0 = \left(V_{out} + L \frac{di}{dt} \right) i = V_{out} i + L \frac{di}{dt} i \quad (1-5)$$

由式 (1-4) 可以看到：电感的电流变化率小于零，电感电流下降，电感释放功率等于输出功率，能量在电感中由磁能转化为电能，即电感向负载提供电能。

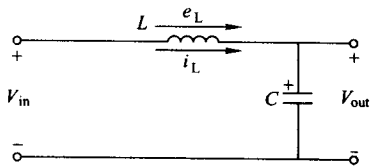


图 1-9 开关管导通期间的等效电路

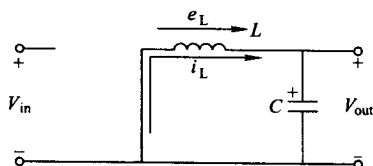


图 1-10 开关管关断期间的等效电路

4. 主要波形 Buck 变换器的主要工作波形如图 1-8 所示, 由波形图可以看出:
主开关的电压峰值

$$V_{DSm} = V_{in} \quad (1-6)$$

续流二极管的电压峰值

$$V_{VDm} = -V_{in} \quad (1-7)$$

主开关管的电压与续流二极管的电压之和等于输入电压, 符合基尔霍夫电压定律 (KVL), 即

$$v_{DS} + v_{VD} = V_{in} \quad (1-8)$$

式中, V_{DSm} 、 V_{VDm} 、 V_{in} 、 v_{DS} 、 v_{VD} 分别为主开关管的电压峰值、续流二极管的电压峰值、电源输入电压、主开关管电压、续流二极管电压。

主开关管的电流与续流二极管的电流之和等于电感电流, 符合基尔霍夫电流定律 (KCL), 即

$$i_{DS} + i_{VD} = i_L \quad (1-9)$$

其中, i_{DS} 、 i_{VD} 、 i_L 分别为主开关管的电流、续流二极管的电流、电感电流。

5. 定量关系

(1) 从图 1-8 及电路原理可知, 各主要元件上的电压、电流:

开关管 VF 的电压峰值

$$V_{DSm} = V_{in} \quad (1-10)$$

续流二极管 VD 的电压峰值

$$V_{VDm} = V_{in} \quad (1-11)$$

开关管 VF 的电流峰值

$$I_{DSm} = I_{inm} \quad (1-12)$$

续流二极管 VD 的电流峰值

$$I_{VDm} = I_{in} \quad (1-13)$$

式中, I_{DSm} 、 I_{in} 、 I_{VDm} 分别为主开关管的电流峰值、输入电流、续流二极管的电流峰值。

(2) 由能量守恒原理可以推导输入/输出关系:

瞬时输入功率

$$p_{in} = v_{in} i_{in} \quad (1-14)$$

式中, p_{in} 、 v_{in} 、 i_{in} 分别为瞬时输入功率、瞬时输入电压、瞬时输入电流。

对于直流电, 通常用平均值表示, 输入功率平均值

$$P_{in} = V_{in} I_{in} = V_{in} \frac{t_{on}}{T} I_L = V_{in} D I_L \quad (1-15)$$

式中, P_{in} 、 t_{on} 、 T 、 D 、 I_L 分别为输入功率平均值、主开关管导通时间、变换器的开关周期、开关管导通的占空比、电感电流平均值。

输出功率瞬时值

$$p_{out} = v_{out} i_{out} \quad (1-16)$$

式中, p_{out} 、 v_{out} 、 i_{out} 分别为输出功率瞬时值、输出电压瞬时值、输出电流瞬时值。

输出功率平均值

$$P_{out} = V_{out} I_{out} = V_{out} I_L \quad (1-17)$$

式中, P_{out} 、 V_{out} 、 I_{out} 、 I_L 分别为输出功率平均值、输出电压平均值、输出电流平均值、电感电流平均值。

由能量守恒定律, 输入功率等于输出功率:

$$P_{\text{in}} = V_{\text{in}} D I_L = P_{\text{out}} = V_{\text{out}} I_L \quad (1-18)$$

式中, P_{in} 、 V_{in} 分别为输入功率平均值、输入电压平均值。整理得

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} D \quad (1-19)$$

式中, D 的范围为 $0 \sim 1$, 或

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{on}}} V_{\text{in}} dt = \frac{1}{T} V_{\text{in}} t_{\text{on}} = \frac{t_{\text{on}}}{T} E_{\text{in}} = D V_{\text{in}} \quad (1-20)$$

6. 小结 可以认为, Buck 变换器由主开关和低通滤波器构成; 开关的作用是将输入直流电斩波为脉冲宽度调制 (PWM) 电压脉冲串, PWM 电压脉冲串的幅度为输入直流电压, 其直流分量为输出电压平均值。因此低通滤波器的作用就是滤除交流分量, 保留直流分量。因此从低通滤波器的输入、输出电压幅值看, 低通滤波器是 Buck 变换器的核心部分, 也就是说, 当低通滤波器输入端加一 PWM 电压脉冲串时, 输入、输出电压关系就是 Buck 变换器的输入、输出电压的关系。因此在一些电路的演化中, 可以将带有续流二极管的低通滤波器认为是 Buck 变换器。

1.1.2 Boost 变换器

变压器既可以降压又可以升压, 在 DC/DC 变换器中也应具有这一功能。

1. 基本思路 Boost 变换器是将输入电压提升, 获得高于输入电压的输出电压。由于输出电压高于输入电压, 采用类似 Buck 的电路拓扑无法实现。因此, 实现这一目标的思路是: 首先, 由于输出电压高于输入电压, 为防止输出电能回流到输入, 输入与输出端应单向导电, 实现这一功能, 可利用二极管实现, 电路如图 1-11 所示; 第二, 如何提升电压, 由基本电路原理可以知道: 电容器的电压不能跃变, 同时由于输入、输出均为电压源, 两电压源不能直接相连。因此可以考虑采用电感提升电压, 即 $e = L di/dt$, 改变 di/dt 即可改变电感两端电压。考虑电源能向输出端直接提供电能, 电感可置于输入与二极管之间, 如图 1-12 所示。最后在电感与二极管之间接一开关管, 开关管的另一电极接在公共负端, 电路如图 1-13 所示。Boost 电路就是在这个思路下形成的。

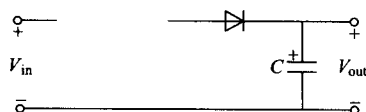


图 1-11 输入/输出间接入二极管

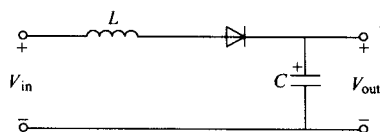


图 1-12 输入/输出间接入电感

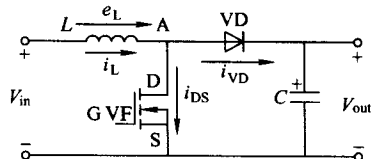


图 1-13 Boost 变换器的主电路

2. 电路运行原理与电磁能量转换原理 图 1-13 电路中只有一个受控元件, 而受控元件工作时只有两个状态: 导通与关断。

(1) VF 导通期间: 由于 A 点电压为电源负电压, 二极管 VD 阳极上为反向电压, 不导

通。等效电路如图 1-14 所示。根据基尔霍夫电压定律 (KVL)，电路左侧的电压平衡方程式为

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} \quad (1-21)$$

电感两端电压为左正右负，很明显， $V_{in} > 0$ ， L 为正常数，则 $di/dt > 0$ ， $i_L \uparrow$ ，电感 L 储能增加。电源电压 V_{in} 向 L 提供电能，电感 L 将电能转化为磁能，电感上的电流 i_L 为

$$i_L = I_L(0) + \frac{V_{in}}{L}t \quad (1-22)$$

其中， $I_L(0)$ 为开关管 VF 导通前的电感电流初始值。

二极管 VD 上的电压为 $-V_{out}$ ，输出负载的电能由输出电容 C 供给。

(2) VF 关断期间：VF 关断后，由于 L 上的电流不能跃变， L 为反抗电流变化寻求导电通路而产生感生电动势 $e = L di/dt$ ，迫使二极管 VD 导通形成电感电流通路，电路如图 1-15 所示。

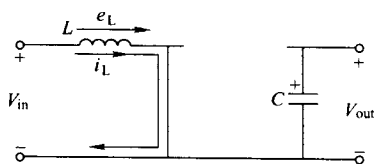


图 1-14 开关管导通期间的等效电路

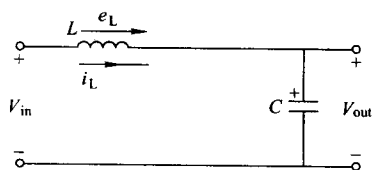


图 1-15 开关管关断期间的等效电路

根据 KVL，电压平衡方程式为

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + V_{out} \quad (1-23)$$

或

$$V_{in} i_L = L \frac{di}{dt} i_L + V_{out} i_L \quad (1-24)$$

由于 $V_{in} < V_{out}$ ， $di/dt < 0$ ，电感 L 上的电流 $i_L \downarrow$ ，并释放储能。由于输入功率小于输出功率，输入功率不足的部分由电感 L 释放储能的形式提供（电感 L 将磁能转化为电能）。

3. 主要波形 Boost 电路的主要工作波形如图 1-16 所示。

由图 1-13 电路原理及图 1-16 波形可以看出各

主要元件上的电压、电流：

开关管 VF 电压峰值

$$V_{DSm} = V_{out} \quad (1-25)$$

或

$$V_{DSm} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (1-26)$$

提升二极管 VD 的电压峰值

$$V_{VDm} = V_{out} \quad (1-27)$$

或

$$V_{VDm} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (1-28)$$

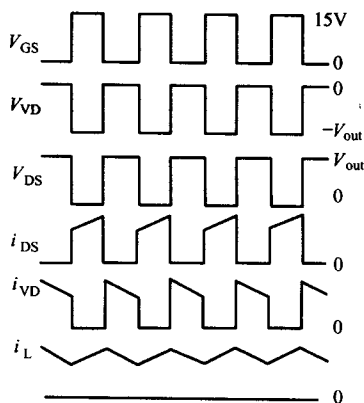


图 1-16 Boost 电路的主要工作波形