

▶ 第3版 ◀

新型开关电源 典型电路设计与应用

刘军 主编 赵同贺 副主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新型开关电源典型电路 设计与应用

第 3 版

刘 军 主 编
赵同贺 副主编



机械工业出版社

本书共分为7章：第1章介绍开关电源的基本工作原理；第2章全面叙述开关电源元器件的特性与选用；第3章对6种不同功率的开关电源进行了较为详细的说明；第4章介绍了功率因数校正转换电路的设计，列举了多种电源功率因数校正电路的设计方法；第5章介绍了软开关技术与电源效率；第6章对PCB设计技术做了详尽的叙述；第7章给出了对开关电源一些关键技术的问答，为电源开发人员打开电源开发的大门。

本书立足开关电源的高频变压器设计，对开关电源的疑点和难点，剖析深入，内容丰富，知识全面，文字通畅，易于理解。本书对电源开发工程师技术人员有很高的参考价值，也可供高等院校相关专业师生阅读。

图书在版编目（CIP）数据

新型开关电源典型电路设计与应用/刘军主编. —3版. —北京：机械工业出版社，2019.5

ISBN 978-7-111-62188-1

I. ①新… II. ①刘… III. ①开关电源-电路设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第041340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：闫洪庆 责任编辑：闫洪庆

责任校对：王明欣 封面设计：马精明

责任印制：郜敏

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2019年4月第3版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·431千字

标准书号：ISBN 978-7-111-62188-1

定价：59.00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

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

封面无防伪标均为盗版

网络服务

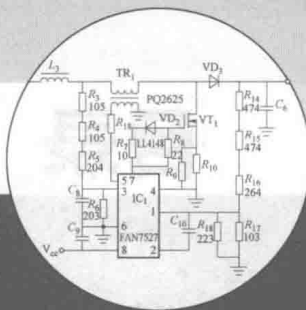
机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

前言



本书对国内外开关电源电路进行了分析，全面阐述了开关电源的最新应用技术；对电路原理进行了详细的讲解，并对电路的元器件参数进行了计算，其计算的方法是利用欧姆定律和基尔霍夫定律；对高频变压器采用多种计算方法进行计算，结果相差很小；为了进一步提炼开关电源知识，本书还列举了 32 条问答。

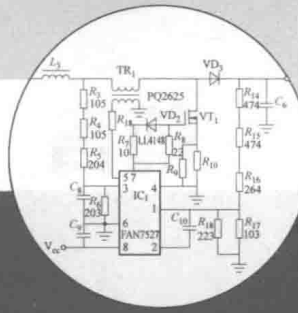
本书共分为 7 章：第 1 章介绍开关电源的基本工作原理；第 2 章全面叙述开关电源元器件的特性与选用；第 3 章对 6 种不同功率的开关电源进行了较为详细的说明；第 4 章介绍了功率因数校正转换电路的设计，列举了多种电源功率因数校正电路的设计方法；第 5 章介绍了软开关技术与电源效率；第 6 章对 PCB 设计技术做了详尽的叙述；第 7 章给出了对开关电源一些关键技术的问答，为电源开发人员打开电源开发的大门。

本书立足开关电源的高频变压器设计，对开关电源的疑点和难点，剖析深入，内容丰富，知识全面，文字通畅，易于理解。本书对电源开发工程师技术人员有很高的参考价值，也可供高等院校相关专业师生阅读。

本书由刘军担任主编，赵同贺担任副主编，参加编写的还有刘苡辰、吴少英、沙锦芬、徐春华、叶良君、汪志清、谢海平、赵丹丹、王福元、余望兴、胡桂珍、张继芬、陈长秀、刘春娥、王伟超、王通、赵雪燕、赵舰、陈芳。

由于时间仓促，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

目录



前言	事项	63
第1章 开关电源基本工作原理	1.6 恒功率电路的设计	65
1.1 开关电源基本形式	1.6.1 恒流、恒压的工作原理	65
1.1.1 什么是开关电源	1.6.2 电流控制电路设计	66
1.1.2 开关电源的工作程序	1.6.3 电压控制电路设计	67
1.1.3 开关电源的分类	1.6.4 反馈电压的计算	67
1.1.4 开关电源的结构形式	第2章 开关电源元器件的特性与	
1.2 开关电源设计要求和原则	选用	68
1.2.1 反激式电路设计要求和原则	2.1 功率开关晶体管的特性与选用	68
1.2.2 正激式电源设计要求和原则	2.1.1 MOSFET的特性及主要参数	68
1.2.3 半桥式电源设计要求和原则	2.1.2 MOSFET驱动电路及要求	69
1.2.4 全桥式电源设计要求和原则	2.1.3 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的	
1.2.5 推挽式电源设计要求和原则	特性及主要参数	70
1.3 开关电源单元电路工作原理	2.1.4 IGBT驱动电路	71
1.3.1 整流电路	2.1.5 晶体管的开关时间与损耗	72
1.3.2 输入低通滤波电路	2.2 软磁铁氧体磁心的特性与选用	73
1.3.3 峰值电压钳位吸收电路	2.2.1 磁性元件在开关电源中的作用	74
1.3.4 功能转换快速开关电路	2.2.2 磁性材料的基本特性	74
1.3.5 输出恒流、恒压电路	2.2.3 磁心的结构及选用原则	76
1.3.6 PFC转换电路	2.3 光耦合器的特性与选用	78
1.3.7 PWM转换电路	2.3.1 光耦合器的分类	79
1.3.8 开关电源保护电路	2.3.2 光耦合器的工作原理	79
1.3.9 开关电源软启动电路	2.3.3 光耦合器的主要参数	79
1.4 开关电源电路设计理论	2.3.4 光耦合器的选用原则	80
1.4.1 开关电源控制方式设计	2.4 二极管的特性与选用	81
1.4.2 低通滤波抗干扰电路设计	2.4.1 开关整流二极管	81
1.4.3 整流滤波电路设计	2.4.2 稳压二极管	82
1.4.4 整流二极管及开关管的计算选用	2.4.3 快速恢复及超快速恢复二极管	83
1.4.5 开关电源吸收回路设计	2.4.4 肖特基二极管	85
1.5 开关电源多路输出反馈回路设计	2.4.5 瞬态电压抑制器	85
1.5.1 多路输出反馈电阻的计算	2.5 自动恢复开关的特性与选用	86
1.5.2 多路对称型输出的实现	2.5.1 自动恢复开关的工作原理	86
1.5.3 多路输出变压器的设计	2.5.2 自动恢复开关的检测方法和选用	
1.5.4 设计多路输出高频变压器的注意	原则	87



2.6 热敏电阻	88	3.3.3 UCC28600 电路特点	130
2.7 TL431 精密稳压源的特性与选用	89	3.3.4 UCC28600 的工作原理	131
2.7.1 TL431 的性能特点	90	3.3.5 脉冲变压器的设计	134
2.7.2 TL431 的工作原理	90	3.3.6 UCC28600 高频变压器的设计	
2.7.3 TL431 的应用	90	计算	136
2.7.4 TL431 的检测方法	91	3.3.7 UCC28600 电路元器件参数的	
2.8 压敏电阻	91	计算	141
2.8.1 压敏电阻的特性与选用	91	3.4 基于 ML4800 构成的 200W 高转换	
2.8.2 压敏电阻的主要参数	92	效率电源设计	147
2.8.3 压敏电阻的分类	92	3.4.1 控制芯片功能简介	147
2.9 电容器的特性与选用	92	3.4.2 基于 ML4800 的开关电源工作	
2.9.1 陶瓷电容	92	原理	148
2.9.2 薄膜电容	94	3.4.3 脉冲变压器设计 (TR_1)	150
2.9.3 铝电解电容	95	3.4.4 高频变压器设计 (TR_2)	152
2.9.4 固态电容	98	3.4.5 ML4800 电路元器件参数的计算	155
2.9.5 超级电容器	98	3.5 基于 L6598 构成的 246W 准谐振半桥式	
2.10 磁珠	100	电源设计	159
2.10.1 磁珠的特性	100	3.5.1 NCP1653 的功能特点	159
2.10.2 磁珠的主要参数	100	3.5.2 零电压谐振变换的工作原理	162
2.10.3 磁珠的选用	101	3.5.3 L6598 电路性能特点	162
2.10.4 磁珠的分类	101	3.5.4 L6598 电路主要元器件参数的	
2.11 大功率散热器	101	计算	165
2.11.1 散热器的基本原理	102	3.5.5 高频变压器设计	168
2.11.2 散热器的设计	102	3.6 基于智能化同步整流 NCP1280 构成的	
第 3 章 不同输出功率电源设计	104	300W 智能化同步整流电源设计	172
3.1 基于 UC3842 构成的 46W、工作频率		3.6.1 三种主控芯片的特点	172
500kHz 的电源设计	104	3.6.2 NCP1280 电路工作原理	174
3.1.1 UC3842 电路特点和结构	104	3.6.3 NCP1280 电路主要元器件参数的	
3.1.2 UC3842 电路元器件参数的计算	106	计算	175
3.1.3 输出控制电路元器件的计算	108	3.6.4 高频变压器 TR_3 设计方法	178
3.1.4 UC3842 电源高频变压器的设计		第 4 章 功率因数校正转换电路设计	182
计算	109	4.1 电流谐波	182
3.2 基于 UC3843 构成的 100W 恒功率		4.1.1 电流谐波的危害	183
电源设计	114	4.1.2 功率因数	183
3.2.1 UC3843 功能简介及引脚特点	115	4.1.3 功率因数与总谐波含量的关系	184
3.2.2 电路特点	115	4.1.4 功率因数校正的意义与基本	
3.2.3 UC3843 电路工作原理	116	原理	185
3.2.4 电路元器件设计及参数的计算	118	4.2 有源功率因数校正	186
3.2.5 UC3843 高频变压器的计算	122	4.2.1 有源功率因数校正的主要优	
3.3 基于 UCC28600 构成的 150W 高效绿色		缺点	186
电源	128	4.2.2 有源功率因数转换的控制方法	188
3.3.1 UCC28600 引脚功能及特点	128	4.2.3 峰值电流控制法	188
3.3.2 L6562 引脚功能及特点	129	4.2.4 滞环电流控制法	189



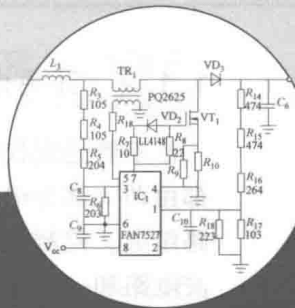
4.2.5 平均电流控制法	191	5.2 零开关脉宽调制变换电路	233
4.3 有源功率因数校正电路设计	192	5.2.1 ZCS-PWM 变换电路	233
4.3.1 峰值电流控制法电路设计	192	5.2.2 ZVS-PWM 变换电路	234
4.3.2 UC3854 平均电流控制法电路 设计	198	5.3 零开关脉宽调制变换电路	235
4.3.3 ML4813 滞环电流控制法电路 设计	201	5.3.1 ZCT-PWM 变换电路	235
4.4 无源功率因数校正电路设计	204	5.3.2 ZVT-PWM 变换电路	237
4.4.1 无源功率因数校正电路的基本 原理	205	5.4 直流/直流零电压开关脉宽调制变换 电路	238
4.4.2 无源功率因数校正电路设计	205	5.4.1 DC/DC 有源钳位正激式变换 电路	238
4.5 具有 PFC 与 LLC 双重调制转换的 PLC810PG 电源	207	5.4.2 DC/DC 有源钳位反激式变换 电路	239
4.5.1 LLC 谐振变换拓扑结构变换	207	5.4.3 DC/DC 有源钳位正反激式组合 变换电路	240
4.5.2 PLC810PG 电路工作原理	209	5.5 电源效率	243
4.5.3 PLC810PG 电路主要参数的计算	209	5.5.1 怎样设计高频变压器	243
4.5.4 高频变压器设计	211	5.5.2 开关电源效率的设计	245
4.6 具有“三高一小”的 FAN4803 功率 因数转换电源	213	第 6 章 PCB 设计技术	249
4.6.1 FAN4803 电路特点	213	6.1 PCB 技术应用	249
4.6.2 FAN4803 电路工作原理	216	6.1.1 PCB 的类型	249
4.6.3 PWM 功率级电路工作原理及 脉冲变压器设计	218	6.1.2 PCB 的布局、布线要求	250
4.7 输出低电压、大电流的 L6565 功率 因数转换电源	220	6.1.3 PCB 的设计过程	251
4.7.1 L6565 电路特点	220	6.1.4 PCB 的总体设计原则	252
4.7.2 L6565 与 L6561 组合电路工作 原理	220	6.1.5 PCB 的布线技巧	253
4.7.3 升压变压器 TR ₁ 设计方法	223	6.1.6 元器件放置要求及注意事项	254
4.7.4 高频变压器 TR ₂ 设计方法	224	6.2 PCB 抑制电磁干扰的新技术	255
4.8 具有谐振式临界电流控制模式的 L6563 功率因数转换电源	225	6.2.1 表面积层技术	255
4.8.1 L6563 的功能特点	225	6.2.2 微孔技术	255
4.8.2 L6563 及 L6599 的工作原理	226	6.2.3 平板变压器设计技术	256
4.8.3 L6563 电路主要元器件参数的 计算	228	6.3 PCB 可靠性设计	257
4.8.4 高频变压器设计方法 1	230	6.3.1 PCB 的地线设计	257
4.8.5 高频变压器设计方法 2	231	6.3.2 PCB 的热设计	258
4.8.6 高频变压器设计方法 3	231	6.3.3 PCB 的抗干扰技术设计	258
第 5 章 软开关技术与电源效率	232	6.4 如何把原理图转换为 PCB 图	259
5.1 软开关功率变换技术	232	6.4.1 元件属性的设置	259
5.1.1 硬开关转换功率损耗	232	6.4.2 电路布线	261
5.1.2 准谐振变换电路的意义	233	6.4.3 由原理图生成网络表	261
		6.4.4 元件自动布局	262
		6.5 如何快速有效地制作 PCB	263
		第 7 章 开关电源技术问答	266
		1. 什么是电磁干扰 (EMI)? EMI 是开关电源 哪些部件产生的? 干扰的方式有哪些? 有什么抑制方法?	266



2. 如何提高开关电源的效率? 266
3. 振荡变压器温度高低与哪些因素有关?
如何克服不利的因素? 266
4. 什么是瞬态干扰? 抑制瞬态干扰采用
什么办法? 266
5. 磁心的气隙有什么作用? 气隙的大小与
哪些因素有关? 267
6. 功率因数校正的工作原理是什么? 有几种
变换方法? 各有什么优缺点? 267
7. 什么是高频电流趋肤效应和邻近效应? ... 267
8. 屏蔽是防止干扰的一种有效方法, 有几种
屏蔽方式? 各有什么不同? 267
9. DC/DC 变换的意义是什么? 267
10. 什么是零电流 (电压) 开关脉宽调制
变换? 267
11. 准谐振的含义是什么? 267
12. 什么是总谐波含量? 它是怎样产生的?
它有什么危害? 267
13. 什么是电源效率? 什么是功率? 什么
是功率因数? 268
14. 什么是同步整流? 有什么优点? 268
15. 什么是电流前置技术? 有什么意义? 268
16. 什么是斜坡补偿? 有什么作用? 268
17. 磁饱和电感的意义是什么? 269
18. 均流技术是什么? 269
19. 什么是共模干扰? 什么是差模干扰?
其区别在哪里? 用什么方法抑制
干扰? 269
20. 一次整流滤波的电解电容器, 它的容量大,
有哪些危害? 其容量大小怎样确定? 269
21. 高频变压器的剩磁是怎样产生的?
怎样消除剩磁? 269
22. 什么是电源电压调整率? 什么是电源
负载调整率? 怎样进行计算? 269
23. 节流阻尼式变换器 (RCC) 怎样选择
占空比? 270
24. 输出纹波电压是如何产生的? 如何
消除? 270
25. LLC 变换是什么? 有什么优点? 270
26. 设计开关电源输出功率时要考虑哪些
因素? 270
27. 开关电源通电后没有电压输出的原因
是什么? 271
28. 电源在开机时 IC 发热, 甚至发生爆炸的
原因是什么? 271
29. 电源开机正常, 但 5min 后整机发热效率低
的原因是什么? 271
30. 电源的工作频率低, 输出电压不稳的原因
是什么? 271
31. 伴随着输入电压升高或负载减轻, 输出电压
也随之升高的原因是什么? 271
32. PFC 不起作用, 总谐波失真超过 10%,
PFC 电路输出电压达不到 380V 的原因
是什么? 271

第 1 章

开关电源基本工作原理



1.1 开关电源基本形式

1.1.1 什么是开关电源

开关电源是开关稳压电源的简称，可将一种电源形态变换成另一种形态。这种变换是自动控制的，并具有各种保护。它是利用现代电子技术、新材料科学，通过集成控制输出所需要的电压。这种电源具有体积小、重量轻、功耗低、效率高、纹波小、智能化程度高、使用方便等优点。电源犹如人体的心脏，是所有电动能源设备的动力。通常适用电源标记有各种特性参数，如功率、电压、频率、使用温度等。正因为开关电源具有很多优点，所以它广泛用于通信、仪器仪表、工业自动化、航空航天、医疗设备、交通运输、家用电器等领域。随着电子技术的发展，新材料不断地涌现，一大批高频率、高效率、高可靠性的新型电源相继问世。

开关电源在变换过程中，要达到我们所需要的要求。例如，交流变换成直流，高电压变换成低电压，大功率变换成小功率等。开关电源在变换过程中，用高频变压器将一次侧与二次侧隔离，称为离线式开关电源，常用的 AC/DC 变换器就是离线式开关变换器，也称为整流离线变换。输入电压经低通滤波，桥式整流，直接到用电负载，中间不用变压器隔离，称为非隔离式开关变压器。变换的方法是多样的，凡是用半导体功率器件作开关，并具有一定的控制智能性，将一种电源形态变换成另一种形态的电路，叫作开关变换电路。在变换时，能自动控制输出电压并有各种保护的称为完全开关电源。

传统的晶体管调整稳压器是开关电源的鼻祖，它具有结构简单、输出纹波小、噪声低等优点，但是它也有体积大、过载能力低、效率低等缺点。近年来，无工频变压器开关电源技术已被广泛采用。这种电源丢掉了笨重的工频变压器。功率管工作在开关频率 1.5MHz 以上的状态。这样电源的体积和重量大大降低，其效率得到极大的提高，在开关管饱和导通时，漏 (Drain)-源 (Source) 电压降低近似零，在开关管截止时，它的漏极电流为零，其损耗功率小，效率高，可达 95%，具有体积小、重量轻的特点。不但如此，开关电源可直接对供电电网进行滤波调整。电路上所用的滤波电容、电感等元器件的参数特性优于目前所用的电解电容和滤波电感，且体积小，允许使用的环境温度高，对供电电网电压波动范围大的适应能力加大，可获得稳定基准的输出电压，使电网的谐波大大减小，满足了绿色环保的要求。



1.1.2 开关电源的工作程序

不管是现代的开关电源还是过去老旧的开关电源，其工作原理和工作程序都是不变的，都由两大部分组成，即主电路和控制电路。主电路由输入电路、功率变换电路和输出控制电路组成；控制电路则由信号取样电路、控制电路和频率振荡发生器组成。输入电路由低通滤波电路和一次整流电路构成。220V 交流电经低通滤波电路和桥式整流电路后，得到未稳压的直流脉动电压 V_i ，脉动电压经功率因数校正，使它的输入电流与输入电压同相，得到功率因数高、谐波含量低的直流电压。此电压经电子开关和高频变压器进行电能转换，变换成受控制、符合设计要求的高频方波脉冲电压，高频电压经第二次整流滤波后，变为直流电压输出。最后，将输出的电压经分压采样与设置的基准电压进行比较、放大，经过频率振荡发生器，产生一个高频信号，该信号与控制信号叠加，进行脉宽或频率调制，达到脉宽或频率可调的方波信号，这一信号又经放大，去触发开关功率管的“开”与“停”，由开关管的漏极输出一功率较大的脉冲去激发高频变压器的一次绕组，一次绕组所产生的可调的交流电压经高频变压器的耦合变压后，在二次绕组产生频率较高的二次电压，二次电压又经整流滤波，输出一波纹较低的直流电压，所以说，开关电源的实质是两个变换，即功率因数变换和工作频率变换，如图 1-1 所示。

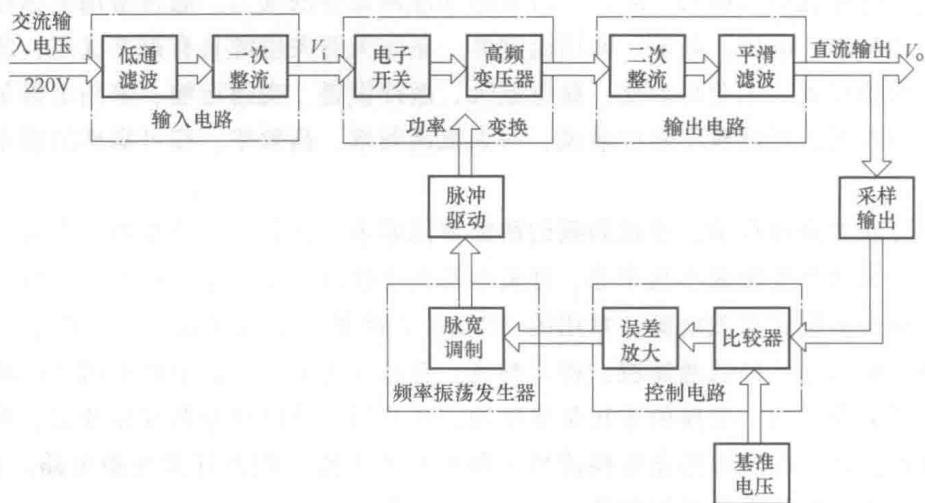


图 1-1 开关电源工作原理框图

高频电子开关是电能变换的主要手段和方法。在一个电子周期 T 内，电子开关的接通时间 t_{on} 与一个电子周期 T 所占时间的比例，叫接通占空比 (D_{on})。 $D_{on} = t_{on}/T$ ，如图 1-2 所示。断开时间 t_{off} 与所占周期 T 比例为断开占空比 D'_{off} ， $D'_{off} = t_{off}/T$ 。开关周期等于开关频率的倒数，即 $T = 1/f$ 。例如一个开关电源的工作频率是 100kHz，它的周期是 $T =$

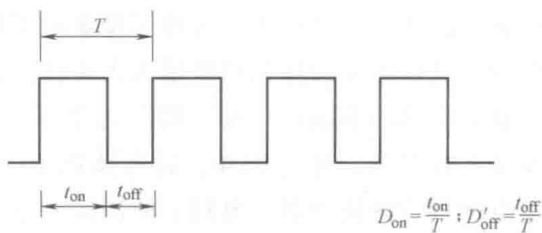


图 1-2 占空比示意图

$1/100 \times 10^3 \mu s = 10 \mu s$ 。很明显，接通占空比越大，开关管接通时间越长，变换器输出的电压



越高,负载感应电压越高,工作频率越高。这对于开关电源的高频变压器实现小型化有帮助,同时,能量传递的速度也快。但是,对于开关电源的高频、开关功率管、控制集成电路以及输入整流二极管来说,由于工作频率的提高,导致开关管、高频变压器的发热量大、损耗大、效率低。对于不同的变换器形式,所选用的占空比大小是不一样的。

开关电源与铁心变压器电源以及其他形式的电源比较起来具有较多的优点:

1) 节能:绿色电源是开关电源中用途最为广泛的电源,它的效率可达到90%,质量好的可达到95%,甚至更高,而铁心变压器的效率只有70%或者更低。美国一般家用电器和工业电气化设备的单机能源效率大于92%。美国的“能源之星”对电子镇流器、开关电源以及家用电器的效率都制定有很仔细的、非常严格的规章条款。

2) 电源的体积小、重量轻。据统计,100W的铁心变压器的重量为1200g左右,体积达到 350cm^3 ,100W的开关电源的重量只有250g,而敞开式电源的重量更轻,体积不到铁心变压器的1/4。

3) 开关电源具有保护功能。在过载、轻载时能实施保护,不易损坏。而其他电源由于本身的原因或使用不当,发生短路或断路甚至烧毁的事故较多,安全性很差。

4) 能方便地改变输出电流、电压,且稳定可控。

5) 能根据用户要求,可设计出各种具有特殊功能的电源。如数字电源、程序遥控电源、水下机器人电源、航天航空高温高压电源等,以满足人们的需要。

1.1.3 开关电源的分类

目前开关电源的种类很多,结构既有简单的也有复杂的,下面从五个方面进行划分:

1. 按工作性质分类

所谓工作性质就是开关电源的“开”和“关”的特点,按其特点分为“硬开关”和“软开关”两种。硬开关是指电子脉冲,在外加信号的控制下强行对开关晶体管进行“通”和“断”,而与电子开关自身流过的电流以及两端加入的电压无关,只与脉冲开关信号有关。显然,开关管处在接通和关断期间是有电流、电压存在的,因此,这种工作方式是有损耗的。但是这种变换方式比其他变换方式的控制形式简单很多,成本也较低,所以硬开关现在在很多地方仍然应用,如脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)器就属于硬开关。目前,很多开关电源都用PWM来控制,因为技术要求不很高,所以用得比较多。另一类叫软开关,电子开关在零电压下导通,在零电流下关断。可见电子开关是在“零状态”下工作的,在这种状态下工作的开关电源,理论上,其损耗为零,工作效率很高,软开关还对浪涌电压、脉冲尖峰电压有很强的抑制能力,它的工作频率可以提高到5MHz以上,开关电源的重量和体积则可进行更大的改变。为了实现零电压导通和零电流关断,工程师们常常采用谐振的方法。从电子理论可知道,谐振就是容抗等于感抗,总的电抗为零,这样电路中的电流为无穷大,如果适时将正弦波电压加到并联电感回路上,这时电感上的电压也为无穷大,谐振就会出现。利用谐振时的正弦波,实现软开关。电路上的正弦波振荡到零时,电子开关导通,称为零电压导通;当电子开关的电流振荡到零时,电子开关关断,称为零电流关断。总之,电子开关具有零电压导通、零电流关断的外部条件,叫软开关。这种变换器叫准谐振变换器。要实现软开关,工程师们利用高频频率测试仪,观察谐振波形,调整开关管的导通时间,使电路上的电压处在谐振波谷点上,调整串接在振荡变压器一次绕组上的一个小电容,



再固定开关管的导通时间，通过调整频率，观看高频仪上的波形，直到出现谐振，从而获得准谐振变换器的模式。必须指出，准谐振变换器开关电源的输出电压不随输入电压的变化而变化，它的输出电流也不随输入电流的变化而变化，这种开关电源的变换器依靠谐振频率来稳定输出电压，叫调频开关电源。调频开关电源没有脉宽调制开关电源那么容易控制，再加上高频变压器一次绕组上的峰值电压高，开关管所承受的应力大，目前还没有得到广泛应用。

2. 按变换方式分类

本书所描述的电能变换是通过脉冲宽度改变来传递电能的大小，包括有 AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC 等四种，而 AC/DC、DC/DC 变换是开关电源变换的基本类型，通过控制占空比，改变开关管的通断时间，用电抗器与电容器上蓄积的能量对开关波形进行微分平滑处理，从而有效地调整输出电压。但是，这种变换方式，要想取得理想的效果，还必须对电路设计，及高频变压器设计，采用准确有效的计算方法，对提高开关电源效率，提高 EMI 能力，延长电源寿命才能起到至关重要的效果。

3. 按输入输出有无变压器隔离分类

一般 AC/DC、AC/AC 两种变换是有变压器隔离的，而 DC/DC 变换又分为有变压器隔离和没有变压器隔离两类。每一类有 6 种拓扑，即降压式 (Buck)、升压式 (Boost)、升压-降压式 (Boost-Buck)、串联式 (Cuk)、并联式 (Sepic) 以及塞达式 (Zata)，降压式、升压式两种在开关电源 DC/DC 变换中应用比较多，因为它的电路比较简单、使用安全、转换的效率较高。

4. 按激励方式分类

按激励方式分，有自激式和他激式。自激式包括单激式和推挽式，他激式包括脉冲调频式 (PFM)、脉冲调宽式 (PWM)、脉冲调幅式 (PAM) 和脉冲谐振式 (RSM)，我们用得最多的是脉冲调宽变换器。脉冲调宽变换器有以下几种：正激式 (Forward Converter Mode)、反激式 (Feedback Converter Mode)、半桥式 (Half Bridge Mode)、全桥式 (Overall Bridge Mode)、推挽式 (Push Draw Mode) 和阻塞式 (Ringing Choke Converter) 等 6 种。正激式、反激式、半桥式、全桥式、推挽式这 5 种在市面上出现较多，应用十分广泛。

5. 按谐振方式分类

谐振有串联谐振、并联谐振和串并联谐振，变换器按这 3 种谐振划分出了 3 种方式；另外按能量传递形式来分，有连续和不连续两种。往往一种变换方式包含有激励方式、谐振方式和能量传递方式。例如，大功率、高性能、双管正激式、输出连续传递的 ML4800 电路，包含有多种变换，所以说不能以一种变换方式，来确定电源的变换方式。

1.1.4 开关电源的结构形式

1. 反激式单晶体管变换电路

所谓反激式是指变压器的一次侧极性与二次侧极性相反，其基本电路如图 1-3 所示。如果变压器的一次侧上端为正，则二次侧上端为负。反激式变换器效率高，电路简单，能提供多路输出，所以得到了广泛应用。但是在二次侧输出的电压中，有较大的纹波电压。为了解决这一问题，只有加大输出滤波电容和电感，但这样做的结果是增大了电源的体积。最近，开发人员发现利用小型 LC 噪声滤波器效果比较好。反激式变换器有两种工作模式：一种是

完全能量转换，即变压器在储能周期 t_{on} 中存储的所有能量在反激周期 t_{off} 中传递输送出去；另一种是不完全能量转换，即变压器在储能周期 t_{on} 中存储的部分能量在反激周期 t_{off} 中一直保存着，直至等到下一个储能周期 t_{on} 。在脉宽调制开关变换器中引用完全能量转换模式，可以减少控制电路触发脉冲的宽度，但也会出现波形失真和调制困难等一些问题。

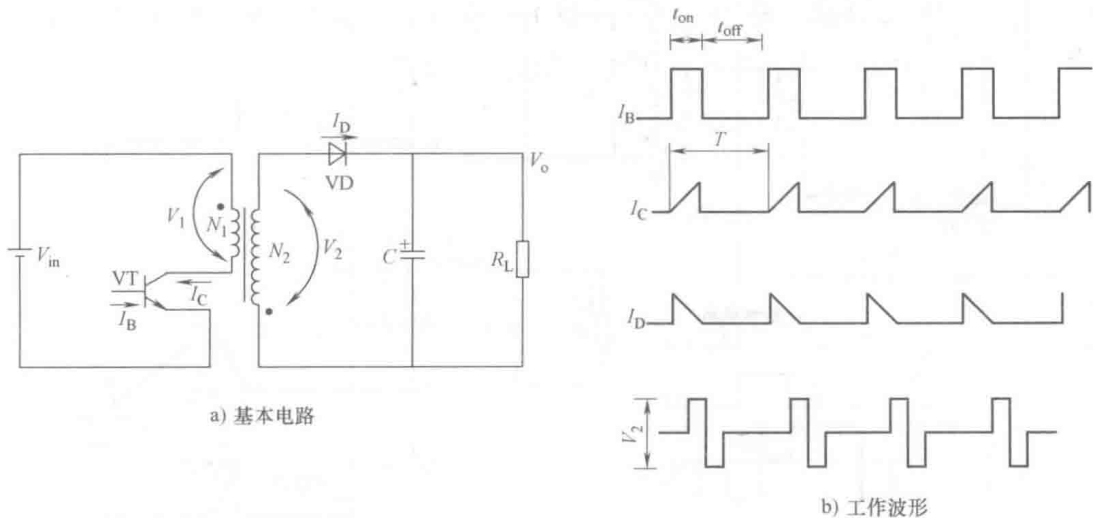


图 1-3 反激式变换电路

反激式变换器是怎样工作的呢？当开关晶体管 VT 截止时（见图 1-3a），变压器一次侧所积蓄的电能向二次侧传送，这时变压器二次绕组下端为负、上端为正，二极管 VD 正向导通，导通电压经电容 C 滤波后向负载 R_L 供给电能。当变压器一次侧存储的电能释放到一定程度后，电源电压 V_{in} 通过变压器的一次绕组 N_1 向晶体管 VT 的集电极充电， N_1 又开始储能。 V_1 上升到一定程度后，晶体管 VT 截止，又开始了新一轮放电。在充电周期，变换器的输出电压为 $V_o = (N_2/N_1)V_{in}D$ ，其中 D 为占空比。从图 1-3b 可以看出，开关管与整流二极管的电流波形为相位相差 180° 的两个锯齿波。

2. 反激式双晶体管变换电路

开关电源的功率在 200W 以上时，不宜采用反激式单晶体管变换电路，这时可以利用反激式双晶体管结构，两管可用双极型晶体管或功率场效应晶体管。其中，场效应晶体管特别适用，无论是固定频率、可变频率、完全和不完全能量传递方式，还是电源价格比，用场效应晶体管代替双极型晶体管是首选方案。

反激式双晶体管变换电路的基本电路如图 1-4a 所示。高频变压器 TR_1 的一次绕组通过两只场效应晶体管接到直流电源 V_{in} 上。两只场效应晶体管需要同时导通、同时截止，要达到的要求通过两个相同相位但又互相隔离的信号，一般用一只双路输出的变压器 TR_2 。与前面介绍的反激式单晶体管变换电路一样，场效应晶体管导通时，只把能量存在磁路中；场效应晶体管截止时，磁能转化为电能送到负载中。二极管 VD_1 、 VD_2 是交叉连接的，这样可把过剩的能量反馈回电源 V_{in} 中，并把两只场效应晶体管都钳位在 V_{in} 电压水平上。所以，采用市电桥式整流的电路，可选用耐压为 400V 的场效应晶体管。

在图 1-4a 所示电路中，变压器漏感起着重要作用。当 VT_1 和 VT_2 导通时，直流电压 V_{in} 加在变压器一次绕组 N_p 上。设绕组的同名端为正，那么输出整流二极管 VD_3 将正向偏置且

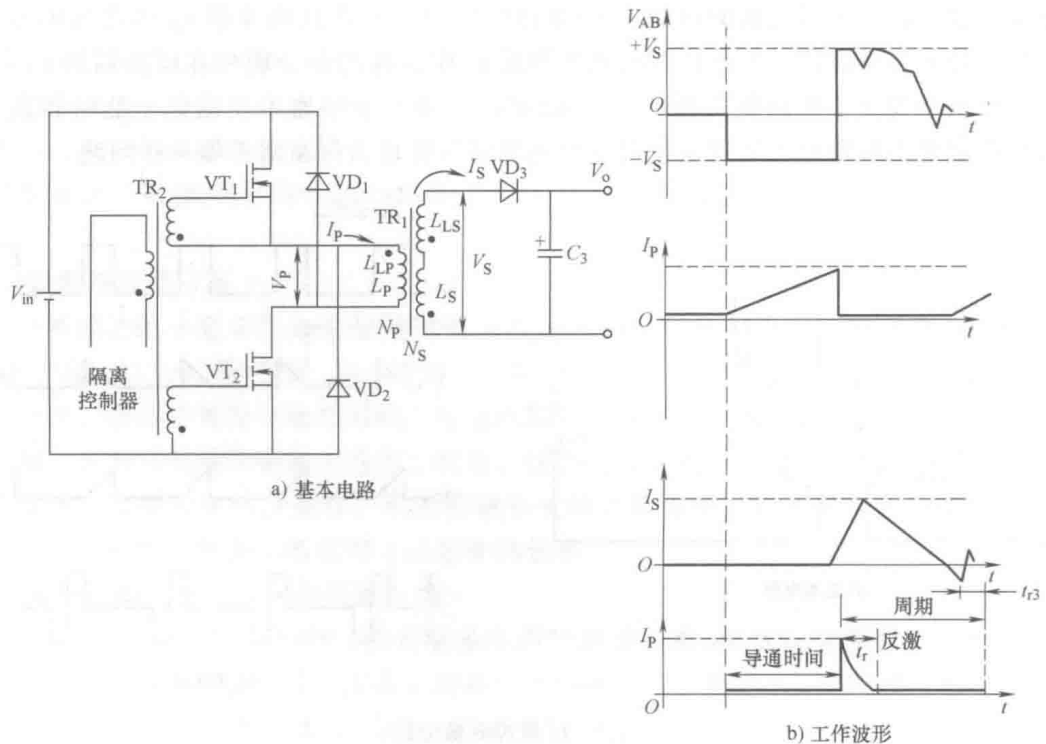


图 1-4 反激式双晶体管变换电路

导通，这样二次绕组中有电流流通，它的漏感为 L_{LS} 。在导通期间，变压器一次绕组的电流呈线性增加，如图 1-4b 所示。

在导通末期，存储在变压器中可耦合到二次侧的磁场能量为 $I_p^2 L_{LP} / 2$ 。一旦 VT_1 和 VT_2 同时截止，二次绕组电流 I_S 降为零。然而，磁感应强度没有改变，则通过反激作用，变压器上所有的电压将反向。二极管 VD_1 、 VD_2 也导通，一次绕组在反激电压作用下使供电电源保持 V_{in} 值。由于绕组的极性反向，二次绕组感应出的反向电动势将导致整流二极管 VD_3 截止。二次绕组感应的电流为 nI_p 值时 ($n = N_p / N_s$)，存储在二次绕组的漏感 L_{LS} 中的能量反馈到电源 V_{in} 中，则一次绕组电压 V_p 降至二次绕组反射电压。此时，二次绕组电压等于 C_3 上的电压折算到一次绕组。通过设计使钳位电压小于供电电源电压 V_{in} ，否则，反激能量将回送到供电电源中。然而，在正常条件下，对于一个完善的能量变换系统，两只场效应晶体管刚截止关断时，存储在变压器磁场中的能量将转移到输出电容和负载上。在两只场效应晶体管截止关断的末期，新一轮周期将开始。

反激式双晶体管变换电路在任何条件下，两只场效应晶体管所承受的电压都不会超过 V_{in} 。 VD_1 、 VD_2 必须是超快速恢复二极管。因为这些元器件在电压超值时特别容易损坏，与反激式单晶体管变换电路相比，开关功率管可选用较低的耐压值。

反激开始时，存储在一次漏电感中的电能经 VD_1 、 VD_2 进行反馈，系统能量损耗小、效率高。当负载减小时，在电路导通期间，变压器一次绕组中存储过多的电能，那么，在下一个周期反激时，将电能反馈至电源 V_{in} ，降低损耗。

反激式双晶体管变换电路与反激式单晶体管变换电路相比，高频变压器不需要反馈绕组。这对于生产商来说，有利于降低成本，缩小体积。

3. 正激式单晶体管变换电路

如图 1-5a 所示, 正激式单晶体管变换电路的变压器纯粹是个隔离元件, 它的一次侧分为两组 N_{1a} 和 N_{1b} , 中心抽头接输入电压的正极, 两端分别接二极管 VD_F 和开关晶体管 VT 的集电极。二次绕组接整流二极管 VD_1 、续流二极管 VD_2 以及电感器 L 。正激式单晶体管变换电路是利用电感 L 储能及传送电能的。变压器的一次和二次绕组是相同的同名端, 由于电感 L 的存在, 它的电感反射到一次侧, 使一次电感增大。

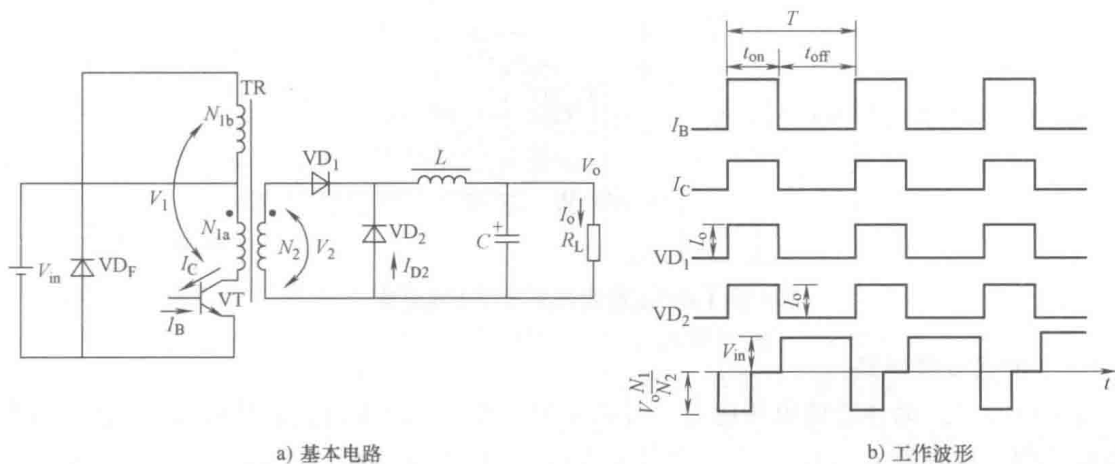


图 1-5 正激式单晶体管变换电路

正激式单晶体管变换电路的工作原理是这样的: 开关晶体管 VT 截止时, 在电感的反激作用下, VD_2 正向导通, 导通后的电路通过电感 L 和负载 R_L 构成回路, 这时电感上的电压等于输出电压 V_o 。电感 L 中存储的能量的大小将影响输出电压的峰值。由图 1-5 可知, 电感电流等于峰值电流。当开关晶体管 VT 导通时, 电源电压经变压器一次绕组向晶体管 VT 充电, 这时变压器一次绕组 N_1 储能, 而绕组 N_2 在二极管 VD_2 的作用下释放电能, 结果 VD_1 导通, VD_2 截止。 VD_1 向电感 L 供电, “感化” 储能, 输出直流电压。当晶体管 VT 截止时, 电感器 L 积蓄的电能经二极管 VD_2 整流、 LC 滤波后, 向负载供电。正激式单晶体管变换电路二次侧整流二极管与开关管集电极的电流是一致的。输出电压 $V_o = (N_2/N_1) V_{in} D$ 。正激式单晶体管变换电路的优点是铜损低, 因为使用无气隙磁心, 电感量较高, 变压器的峰值电流比较小, 输出电压纹波低; 缺点是电路较为复杂, 所用元器件多, 如果有假负载存在, 效率将降低。电源处于空载, 也有一些损耗。它适用于低电压、大电流的开关电源, 多用于 150W 以下的小功率场合。它还具有多台电源并联使用而互不影响的特点, 而且可以自动均压, 而反激式却不能做到这点。

4. 正激式双晶体管变换电路

正激式双晶体管变换电路 (又称正激式双管变换电路) 是在正激式单晶体管变换电路上再串接一只晶体管而组成的, 这对于高压大功率的开关电源来说更加安全可靠。安全可靠是最大的效益, 所以双管正激式变换电路得到了广泛应用。

如图 1-6 所示, 晶体管 VT_1 、 VT_2 在工作期间同时导通, 或者同时截止。在导通时, 电源电压 V_{in} 加在变压器 TR_2 的一次绕组 N_p 上。在这个工作周期里, 电感 L_1 已经存储了电能, 电流通过续流二极管流 VD_4 后经电感器 L_1 向负载 R_L 供电。由于 VT_1 、 VT_2 的导通, 变压器 TR_2 的一次绕组 N_p 向二次绕组 N_s 感应了电动势, 整流二极管 VD_3 在正向电压作用下导通,



便有电流 I_L 向负载 R_L 供电。但是，供电时间受到二次绕组漏感的影响， I_L 继续保持。在此期间，流经 VD_4 的电流快速减小，直至 VD_4 转为截止。当 VT_1 、 VT_2 截止时，二次绕组电压反向，这时二极管 VD_3 很快截止。在电感 L_1 的反激下， VD_4 进入导通状态，电流经 VD_4 、 L_1 向负载 R_L 供电。当 I_L 慢慢减小后，在变压器一次电压 V_{in} 的帮助下， VT_1 、 VT_2 再次进入导通状态，这就是正激式双晶体管变换电路的电能传递过程。

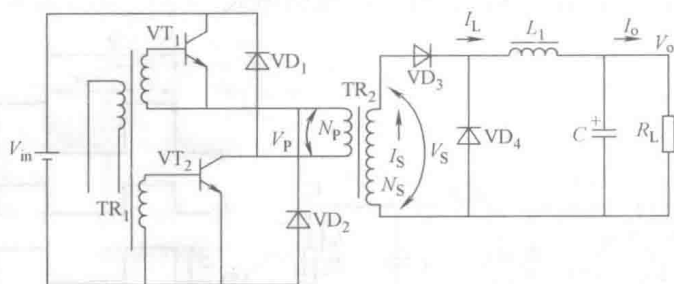


图 1-6 正激式双晶体管变换电路

5. 半桥式变换电路

为了减小开关晶体的电压应力，可以采用半桥式变换电路，它是离线式开关电源较好的拓扑结构。电容器 C_1 、 C_2 与开关晶体管 VT_1 、 VT_2 组成半桥式变换电路，如图 1-7 所示。桥的对角线接高频变压器 TR 的一次绕组。如果 $C_1 = C_2$ ，当电源 V_{in} 接通后，某一只开关晶体管导通，绕组上的电压只有电源电压 V_{in} 的一半。在稳定的条件下， VT_1 导通， C_1 上的电压 $V_{in}/2$ 加在变压器的一次绕组上。由于一次绕组电感和漏感的作用，电流继续流入一次绕组黑点标示端。如果变压器一次绕组漏感存储的电能量足够大，二极管 VD_6 导通，钳位电压进一步变负。在 VD_6 导通的过程中，反激能量对 C_2 进行充电。连接点 A 的电压在阻尼电阻的作用下，以振荡形式最后回到中间值。如果这时 VT_2 的基极有触发脉冲，则 VT_2 导通，一次绕组黑点标示电压变负， I_p 电流加上磁化电流流经一次绕组和 VT_2 ，然后重复前面的过程。不同的是 I_p 变换了方向。二极管 VD_5 对晶体管 VT_1 的导通钳位，反激能量再对电容 C_1 进行充电。

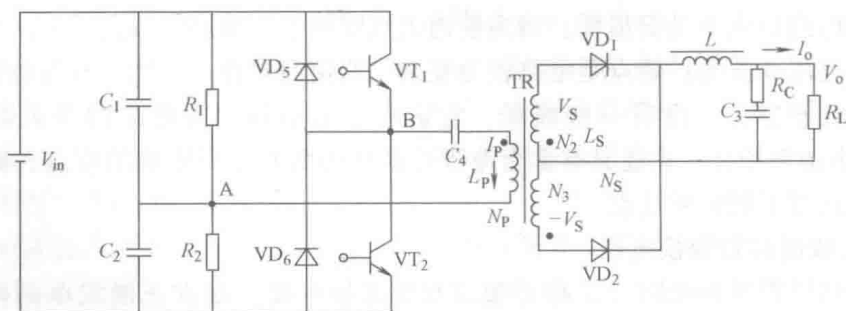


图 1-7 半桥式变换电路

二次电路的工作过程如下：当 VT_1 导通时，变压器二次绕组电压 V_s 使 VD_1 导通，这与正激式变换电路的工作相同。当 VT_1 截止时，两个绕组的电压都下降。在二次电感 L 的反激下，储能继续向负载 R_L 提供电能。当变压器二次绕组电压下降到零时，二极管 VD_2 起着



续流作用，二次电压 V_s 下降到零。在稳定的条件下，晶体管处于导通期间，通过 L 的电流增加；当晶体管关断截止时， L 上的电流减小，这期间它的平均值等于输出电流 I_o 。输出电压为

$$V_o = \frac{V_{in} t_{on}}{N_p T} N_s = \frac{N_s}{N_p} V_{in} D$$

由上式可知，通过控制占空比 D ，在电源电压 V_{in} 和负载电流 I_o 发生变化时，可以保持输出电压 V_o 不变。

半桥式变换电路要求 VT_1 、 VT_2 具有相同的开关特性，但是，即使是在相同的基极脉冲宽度的作用下，也很难保证两只晶体管导通和截止的时间相同。如果用这种不平衡的波形驱动变压器，将会产生偏磁现象，其结果将导致磁心产生磁饱和，从而降低了效率，严重时将导致晶体管烧毁。解决的办法是在一次侧加一只电容 C_4 。

6. 桥式变换电路

桥式变换电路由 4 只开关晶体管组成，与前面介绍的半桥式变换电路相比，多了两只晶体管，如图 1-8 所示。在一个电子开关周期中，4 只晶体管中每一条对角线上的两只管子为一组。它们的“开”和“关”与占空比有关。当给 VT_1 、 VT_3 以等量触发脉冲时，两只晶体管同时导通，等到触发脉冲消失后，两只晶体管又同时截止。电源电压经 VT_1 流入变压器一次绕组 N_p ，并经 VT_3 到电源负极。在这一过程中，变压器一次电流 I_p 逐渐升高。这时，变压器的二次侧得到感应电压，使整流二极管 VD_1 的电压上升， VD_2 的电压下降。这一变化的快慢是由二次绕组 N_s 的漏感及二极管 VD_1 、 VD_2 的性能决定的。如果输出大电流、低电压时，工作频率的影响更大。由于变压器一次电能的增加，二次绕组的感应电流也跟着上升，二极管 VD_2 慢慢进入反向偏置状态，二极管 VD_1 却进入正向导通，电感 L 的电压紧跟着上升。 L 上的电感在反向电动势的作用下，对变压器的一次绕组进行“磁化”，“磁化”的结果是使 VT_1 、 VT_3 截止。 VT_2 、 VT_4 在电压 V_{in} 的作用下趋向导通，又开始了新一轮的“开”“关”工作循环。桥式变换电路和正激式变换电路的输出电压相同。

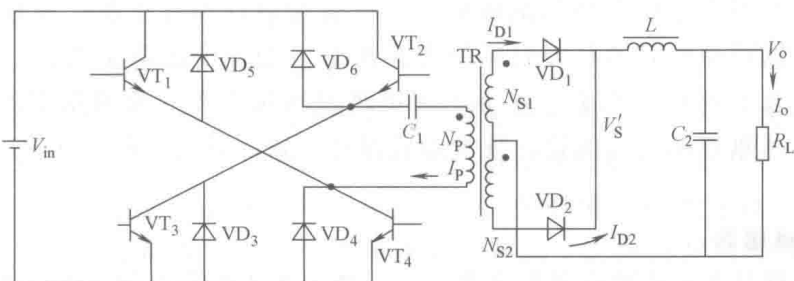


图 1-8 桥式变换电路

7. 推挽式变换电路

在驱动脉冲的作用下， VT_1 、 VT_2 交替导通、截止，如图 1-9 所示。当 VT_1 导通时，电源电压 V_{in} 加到变压器一次绕组 N_{1b} 上， VT_2 的集电极通过变压器耦合作用承受 $2V_{in}$ 的电压。二次绕组 N_{2a} 的上端为正。电流 I_{D1} 经 VD_1 整流和 C 滤波后送到负载 R_L 上。一次电流 I_{C1} 是负载电流折算到一次电流与一次电感磁化电流之和。 VT_1 导通时的一次电流随时间增加而增加，导通时间由驱动脉冲的宽度而定。 VT_1 截止是一次绕组储能和漏感共同作用的结果。