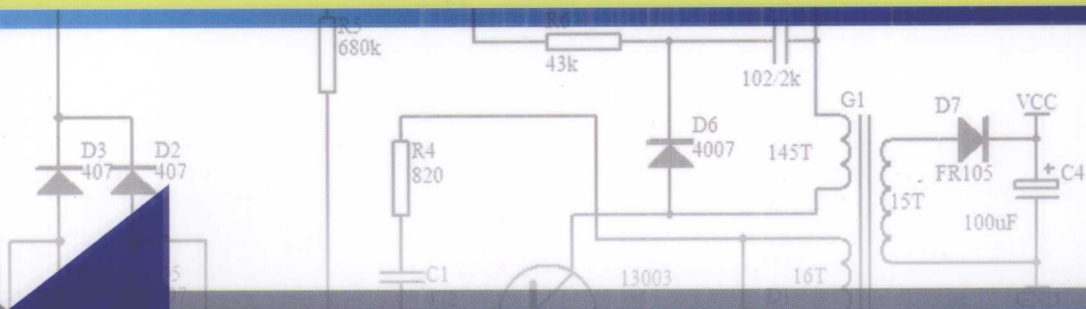


新型 开关电源 典型电路 设计与应用

XINXING KAIGUAN DIANYUAN
DIANXING DIANLU SHEJI YU YINGYONG

赵同贺 等编著



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

赵同贺 等编著



机械工业出版社

本书全面、系统地介绍开关电源基础知识、结构形式和设计理论,结合国内外最新发展动向与新型 IC 控制技术,对元器件的选用、新型控制器的原理,以及对各种开关电源结构形式的高频变压器设计作了示范性的演示,并对开关电源出现的故障作出了分析,讲解了维修方法。本书共分 8 章,分别介绍了开关电源基础知识、开关电源设计理论、开关电源变换电路结构设计与应用、新型开关电源的设计与应用、经济实用电源、软开关技术、有源功率因数校正与电源效率和 PCB 设计技术。

本书对最新开关电源 IC 控制进行了剖析,立题新颖、贴近时代、分析清晰、语言通俗、内容丰富、应用实际,具有较强的实用性和可操作性,对从事通信、军工、家电、医疗、工业控制、交通运输等领域的开关电源设计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/赵同贺等编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-111-28335-5

I. 新… II. 赵… III. 开关电源-电路设计 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 166001 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: 吉玲 责任编辑: 阎洪庆 版式设计: 霍永明

责任校对: 陈延翔 封面设计: 马精明 责任印制: 李妍

中国农业出版社印刷厂印刷

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 493 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-28335-5

定价: 49.00 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

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

开关电源是近年来应用非常广泛的一种新式电源。它具有体积小、重量轻、耗能低、使用方便等优点，在邮电通信、航空航天、仪器仪表、工业设备、医疗器械、家用电器等领域应用效果显著。

目前随着技术的发展，新型多功能开关电源集成控制芯片不断推向市场，大量的超小型、多功能、模块化开关电源不断涌现。工程技术人员在设计、开发、生产、调试这些新产品的过程中会遇到各种技术问题，会遇到一些异常现象和非人为的故障，无形中延长了开发周期和成品出厂时间。作者在多年的开关电源开发生产实践中积累了一些经验，在元器件和材料的选用上有很多体会，在设计、绕制高频变压器的过程中掌握了一定的工艺方法，在电路板的绘制方面有许多经验教训……在此一并呈现给读者，以期对工程技术人员的设计开发工作有一定的促进作用和指导意义。

电源是所有电子设备不可缺少的动力之源，电源变换设备也是电子设备重要的组成部分，各种电子设备对电源供电的要求也各不相同，总的来说，以省电、可靠、安全为宗旨。

本书全面、系统地介绍开关电源的基础知识、结构形式和设计理论，结合国内外最新发展动向与新型 IC 控制技术，对元器件的选用、新型控制器的原理，以及对各种开关电源结构形式的高频变压器设计作了示范性的演示，并对开关电源出现的故障作出了分析，讲解了维修方法。本书共分 8 章，第 1 章介绍了开关电源基础知识；第 2 章介绍了开关电源设计理论；第 3 章细述了开关电源变换电路结构设计与应用；第 4 章讲述了新型开关电源的设计与应用；第 5 章讲述了经济实用电源；第 6 章讲解了软开关技术；第 7 章介绍了有源功率因数校正与电源效率；第 8 章简介了 PCB 设计技术。

本书可供从事通信、军工、家电、医疗、工业控制、交通运输等领域的开关电源设计人员阅读，也可供高等院校相关专业师生参考。本书主要由赵同贺编写及统稿，其他编写人员分别是：王娟，薛素云，李晓芳，李传光，薛鸿德，吴慎山，吴东芳，薛迪强，薛迪胜，薛迪庆，薛彬，齐福存，杨桂玲，李建军，马备战，陈军。

为贯彻新闻出版总署颁布的《图书质量管理规定》，本书稿对行业中常见的一些不规范的名词术语进行了纠正，使其符合规范的名词术语要求，如趋肤效应→集肤效应，均方根值→方均根值，欠压→欠电压，铁芯→铁心，变压器的初级→一次侧，次级→二次侧等等，请读者注意。

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。

作 者

目 录

前言

第 1 章 开关电源基础知识 1

- 1.1 开关电源的含义 1
 - 1.1.1 开关电源简介 1
 - 1.1.2 开关电源的分类 2
- 1.2 开关电源的结构形式 3
 - 1.2.1 反激式单晶体管变换电路 3
 - 1.2.2 反激式双晶体管变换电路 4
 - 1.2.3 正激式单晶体管变换电路 6
 - 1.2.4 正激式双晶体管变换电路 6
 - 1.2.5 半桥式变换电路 7
 - 1.2.6 桥式变换电路 8
 - 1.2.7 推挽式变换电路 8
 - 1.2.8 RCC 变换电路 9
- 1.3 开关电源元器件的特性与选用 10
 - 1.3.1 功率开关晶体管的特性与选用 10
 - 1.3.2 软磁铁氧体磁心的特性与选用 16
 - 1.3.3 光耦合器的特性与选用 21
 - 1.3.4 二极管的特性与选用 23
 - 1.3.5 自动恢复开关的特性与选用 27
 - 1.3.6 热敏电阻的特性与选用 29
 - 1.3.7 TL431 精密稳压源的特性与选用 30
 - 1.3.8 压敏电阻的特性与选用 32
 - 1.3.9 电容器的特性与选用 33

第 2 章 开关电源设计理论 39

- 2.1 开关电源控制方式的设计 39
 - 2.1.1 脉宽调制的基本原理 39
 - 2.1.2 脉冲频率调制的基本原理 40
 - 2.1.3 开关电源反馈电路的设计 40
- 2.2 开关电源各回路设计 42
 - 2.2.1 开关电源输入回路设计 42
 - 2.2.2 开关电源驱动回路设计 45
 - 2.2.3 开关电源吸收回路设计 49
 - 2.2.4 开关电源保护回路设计 49
 - 2.2.5 开关电源软启动回路设计 54
 - 2.2.6 开关电源多路输出反馈回路

设计 57

- 2.3 开关电源优化设计 61
 - 2.3.1 反激式变换电路优化设计 62
 - 2.3.2 半桥式变换电路优化设计 62
 - 2.3.3 全桥式变换电路优化设计 67
 - 2.3.4 控制电路优化设计 68
- 2.4 开关电源设计开发存在的问题 71
 - 2.4.1 电磁干扰问题 71
 - 2.4.2 效率与功率因数问题 77
 - 2.4.3 器件材料问题 78
 - 2.4.4 功率变换控制问题 78
 - 2.4.5 生产工艺问题 78

第 3 章 开关电源变换电路结构设计与应用 80

- 3.1 正激式脉宽调制变换电路 80
 - 3.1.1 NCP1337 的电路特点 80
 - 3.1.2 NCP1337 电路的工作原理与应用 82
 - 3.1.3 正激式高频变压器设计 82
- 3.2 正激式双晶体管变换电路 85
 - 3.2.1 UC3852 的电路特点 85
 - 3.2.2 UC3852 电路的工作原理与应用 87
 - 3.2.3 正激式双晶体管变换电路脉冲变压器设计 88
 - 3.2.4 正激式高频变压器设计 89
- 3.3 反激式脱线变换电路 91
 - 3.3.1 VIPER53 电路特点 91
 - 3.3.2 VIPER53 电路的工作原理与应用 92
 - 3.3.3 VIPER53 电路参数设计 93
 - 3.3.4 反激式高频变压器设计 94
- 3.4 RCC 变换电路 99
 - 3.4.1 RCC 变换电路特点 99
 - 3.4.2 RCC 变换电路的工作原理与应用 99
 - 3.4.3 RCC 变换电路变压器设计 101
- 3.5 半桥式变换电路 104
 - 3.5.1 概述 104
 - 3.5.2 TL494 的电路特点 106

3.5.3	TL494 电路的工作原理与应用	106	4.5	恒功率开关电源	196
3.5.4	TL494 的保护电路	109	4.5.1	采用性能稳定、不间断 SC6858 的恒功率开关电源	196
3.5.5	半桥式高频变压器设计	110	4.5.2	采用能自动检测调节 UC3843 的恒功率开关电源	199
3.6	桥式变换电路	112	4.5.3	采用 ZVS 软启动 NCP1207 的恒功率开关电源	204
3.6.1	UC3525B 电路特点及其应用	113	第 5 章 经济实用电源	208	
3.6.2	UC3525B 电路工作原理	113	5.1	通信电源	208
3.6.3	桥式变换电路变压器的设计	115	5.1.1	采用无辐射、高可靠性 UCC3895 的通信电源	208
3.7	推挽式变换电路	118	5.1.2	采用模块式、大功率 IPM-2M500N 的通信电源	214
3.7.1	概述	118	5.1.3	采用高可靠性、不间断 AC/DC、DC/DC 两种变换 UC3848A 的通信电源	217
3.7.2	UC3825 的电路特点	118	5.2	电视电源	219
3.7.3	UC3825 电路的工作原理与应用	119	5.2.1	采用具有 APFC、抗 EMI 的 TEA2261 的电视电源	219
3.7.4	推挽式高频变压器设计	120	5.2.2	采用具有电荷泵电压转换的 ICEIQS01 的液晶电视电源	220
第 4 章 新型开关电源的设计与应用	124		5.2.3	采用厚膜 TCL2908 的彩电电源	227
4.1	绿色开关电源	124	5.3	计算机电源	231
4.1.1	采用结构简单、控制精确 ML4824 的绿色开关电源	124	5.3.1	采用高效无辐射 SG3535A 的笔记本电脑电源	231
4.1.2	采用具有 ZVS 高转换效率 UCC28600 的绿色开关电源	133	5.3.2	采用具有自动恢复功能的 CW3524 的笔记本电脑电源	234
4.1.3	采用先进的“三高一小” FAN4803 的绿色开关电源	137	5.3.3	采用低电流启动、离线式 LM5021 的台式电脑电源	237
4.2	变频开关电源	143	5.4	充电器电源	240
4.2.1	采用适用于室内外的 UC1864 的变频开关电源	143	5.4.1	采用单片恒功率 LNK501 的手机充电电源	241
4.2.2	采用输入电压宽、性能稳定 UC3845BN 的变频开关电源	150	5.4.2	采用截流式恒功率电动自行车用 6N60 的充电电源	242
4.3	准谐振开关电源	154	5.5	工业电源	244
4.3.1	采用高频率、高效率 MC34067 的准谐振开关电源	154	5.5.1	采用智能化数控机床用 NCP1280 的工业电源	244
4.3.2	采用高效、低耗、低 EMI 的 TEA1610 的准谐振开关电源	161	5.5.2	采用能自动提高功率 PKS606Y 的打印机电源	248
4.3.3	采用输出低电压、大电流 L6565 的准谐振开关电源	164	5.5.3	采用脉冲比率控制模式 IR4015 的锅炉仪表电源	250
4.4	单片开关电源	168	5.6	军工电源	255
4.4.1	采用三端单片 TOP227Y 的双路输出开关电源	168	5.6.1	采用四路控制 TL1464 的军工	
4.4.2	采用四端单片 TNY256P 的高效微型开关电源	175			
4.4.3	采用五端单片 MC33374 的无辐射、高功率开关电源	177			
4.4.4	采用六端单片 TOP246Y 的多功能开关电源	184			

开关电源	255	缺点	277
5.6.2 采用高效平板变压器 IR2086 的 航天开关电源	256	7.2.2 有源功率因数校正的控制方法 ...	278
第 6 章 软开关技术	261	7.2.3 峰值电流控制法	279
6.1 软开关功率变换技术	261	7.2.4 滞环电流控制法	280
6.1.1 硬开关转换功率损耗	261	7.2.5 平均电流控制法	281
6.1.2 准谐振变换电路的意义	262	7.3 有源功率因数校正电路设计	283
6.2 零开关脉宽调制变换电路	262	7.3.1 峰值电流控制法电路设计	283
6.2.1 ZCS-PWM 变换电路	262	7.3.2 UC3854 用平均电流控制法电路 设计	290
6.2.2 ZVS-PWM 变换电路	263	7.3.3 M14813 用滞环电流控制法电路 设计	293
6.3 零开关脉宽调制转换变换电路	264	7.4 电源效率	297
6.3.1 ZCT-PWM 转换变换电路	264	7.4.1 高频变压器性能的提高	297
6.3.2 ZVT-PWM 转换变换电路	265	7.4.2 开关电源效率的提高	298
6.4 直流/直流零电压开关脉宽调制 变换电路	267	7.4.3 印制电路板设计质量的提高	301
6.4.1 DC/DC 有源钳位正激式 变换电路	267	第 8 章 PCB 设计技术	302
6.4.2 DC/DC 有源钳位反激式 变换电路	268	8.1 PCB 技术应用	302
6.4.3 DC/DC 有源钳位正反激式组合 变换电路	269	8.1.1 PCB 的类型	302
第 7 章 有源功率因数校正与电源 效率	273	8.1.2 PCB 的布局、布线要求	303
7.1 电流谐波	273	8.1.3 PCB 的设计过程	304
7.1.1 电流谐波的危害	274	8.1.4 PCB 的总体设计原则	305
7.1.2 功率因数	274	8.1.5 PCB 的布线技巧	306
7.1.3 功率因数与总谐波含量的关系 ...	275	8.1.6 元器件放置要求及注意事项	307
7.1.4 功率因数校正的意义与基本 原理	276	8.2 PCB 抑制电磁干扰的新技术	308
7.2 有源功率因数校正	277	8.2.1 表面积层技术	308
7.2.1 有源功率因数校正的主要优 点	277	8.2.2 微孔技术	308
		8.2.3 平板变压器设计技术	309
		8.3 PCB 可靠性设计	310
		8.3.1 PCB 的地线设计	310
		8.3.2 PCB 的热设计	311
		8.3.3 PCB 的抗干扰技术设计	311

第 1 章 开关电源基础知识

1.1 开关电源的含义

1.1.1 开关电源简介

电源是产生电的装置，表示电源特性的参数有功率、电压、电流、频率等；在同一参数要求下，又有重量、体积、效率和可靠性等指标。我们用的电，一般都需经过变换才能适合使用的需要，例如交流变换成直流，高电压变成低电压等。

按变换方式分，有 AC/DC（交流变换为直流）；AC/AC（交流变换为交流），即改变频率；DC/AC（逆变）；DC/DC，即先将直流变换交流后再变换为直流，变换的方法是多种多样的。自 20 世纪 60 年代起，人们研发出了二极管、晶体管等半导体器件后，就用半导体器件进行变换。所以，凡是用半导体功率器件作开关，将一种电源形态变换成另一种形态的电路，叫做开关变换电路。在变换时，以自动控制稳定输出并有各种保护环节的电路，称为开关电源（Switching Power Supply）。当今，开关电源被誉为高效节能电源，代表着今后电源的发展方向。

开关电源在变换过程中，用高频变压器隔离称之为离线式开关变换器（Off-line Switching Converter），常用的 AC/DC 变换器就是离线式变换器。

开关电源通常由五大部分组成，如图 1-1 所示。

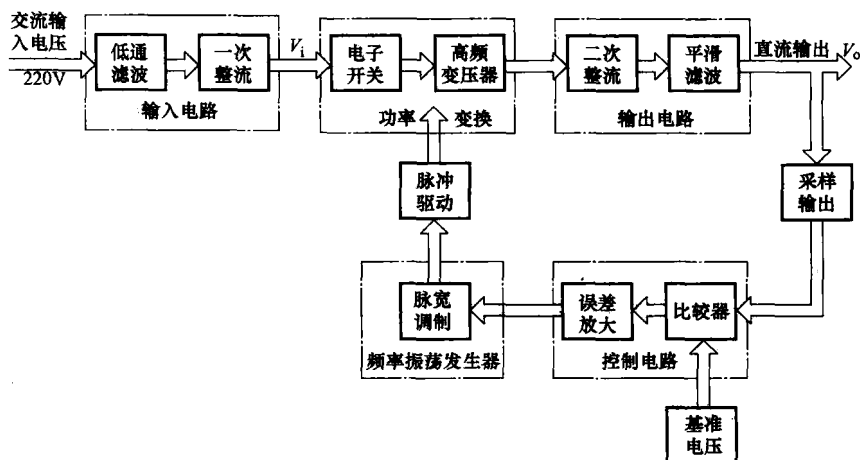


图 1-1 开关电源工作原理框图

第一部分是输入电路，它包含低通滤波和一次整流环节，220V 交流电直接经低通滤波和桥式整流后得到脉动直流电压 V_1 。第二部分是功率变换，它是由电子开关和高频变压器来完成的，是把直流电压变换成受到控制的、符合设计要求的高频方波脉冲电压。第三部分

是输出电路，用于将高频方波脉冲电压经整流滤波后变成直流电压输出，此电压受控于输入电压的波动和输出负载大小的变化。第四部分是控制电路，输出电压经过分压、采样后与电路的基准电压进行比较、放大成为控制信号，它改变调制脉冲宽窄或频率高低，使输出电压保持稳定。第五部分是频率振荡发生器，它产生一种高频波段信号，该信号与控制信号叠加进行脉宽调制，达到脉冲宽度可调。有了高频振荡才有电源变换，所以说开关电源的实质是电源变换。

高频电子开关是电能转换的主要手段和方法。在一个电子开关周期 T 内，电子开关的接通时间 t_{on} 与一个电子开关周期 T 所占时间之比，叫接通占空比 (D)， $D = t_{\text{on}}/T$ ，如图 1-2 所示。

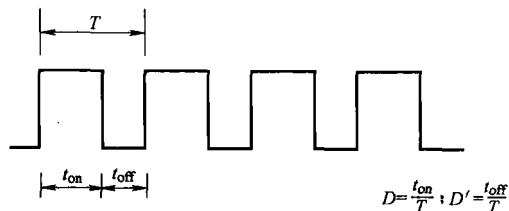


图 1-2 占空比示意图

断开时间 t_{off} 所占周期 T 的比例称为断开占空比 (D')， $D' = t_{\text{off}}/T$ 。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 50kHz ，它的周期 $T = 1/50 \times 10^3 \mu\text{s} = 20\mu\text{s}$ 。很明显，接通占空比 D 越大，变换器输出电压越高，表明电子开关接通的时间越长，负载感应电压越高，工作频率也越高。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，开关电源中的开关功率管、高频变压器、控制集成电路以及输入整流二极管由于工作频率提高，导致发热量高、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：

一是节能。绿色电源是开关电源中用途最为广泛的电源，它的效率一般可以达到 85% ，质量好的可以达到 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。

二是体积小，重量轻。据统计， 100W 铁心变压器的重量为 1200g 左右，体积达 350cm^3 ，而 100W 开关电源的重量只有 250g ，而且敞开式电源更轻，体积不到铁心变压器的 $1/4$ 。

三是开关电源具有各种保护功能，不易损坏。而其他的电源由于本身原因或使用不当，发生短路或断路的事故较多。

四是改变输出电流、电压比较容易，且稳定、可控。

五是根据人们的要求，可设计出各种具有特殊功能的电源，如数字化电源、程序遥控电源等等，以满足人们的需要。

1.1.2 开关电源的分类

目前开关电源的种类很多，从工作性质来分，可分为“硬开关”和“软开关”两种。所谓硬开关，是指电子脉冲、外加控制信号强行对电子开关进行“通”和“断”，而与电子开关自身流过的电流以及两端施加的电压无关。显然，开关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。但是它比其他变换电源的控制形式简单得多，成本也较低，所以硬开关在很多地方仍然在应用，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。另一类叫做软开关, 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, 所以理论上它的损耗为零, 软开关对浪涌电压、脉冲尖峰电压的抑制能力很强, 其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“通”和零电流“断”, 我们常采用谐振的方法。从电子理论可知道, 谐振就是容抗等于感抗, 总的电抗为零, 电路中的电流为无穷大。如果正弦波电压加到并联的电感回路上, 这时电感上的电压就为无穷大。利用谐振电路可实现正弦波振荡, 当振荡到零时, 电子开关导通, 称之为零电压导通 (Zero Voltage Switching, ZVS)。同样, 流过电子开关的电流振荡到零时, 电子开关关断, 称之为零电流关断 (Zero Current Switching, ZCS)。总之, 电子开关具有零电压导通、零电流关断的外部条件, 这种变换器称为准谐振变换器。它是在脉宽调制器上附加谐振网络而形成的, 固定电子开关导通时间, 通过调整振荡频率, 最终使电路产生谐振, 从而获得准谐振变换器的模式。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用电负载的变化而变化, 这种开关电源的主变换器依靠开关频率来稳定输出参数, 我们称之为调频开关电源。调频开关电源没有脉冲调制开关电源那么容易控制, 再加上准谐振电路电压峰值高, 开关所受到的应力大, 目前还没有得到广泛应用。

DC/DC 变换类型是开关电源变换的基本类型, 它通过控制开关通断时间的比例, 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, 从而更有效地调整脉冲的宽度及频率。从输入、输出有无变压器隔离来说, DC/DC 变换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 (Buck-Boost)、串联式 (Cuk)、并联式 (Sepic) 以及塞达式 (Zata)。按激励方式分, 有自激式和他激式两种。自激式包括单管式和推挽式, 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) 4 种, 我们用得最多的是脉冲调宽式变换器。脉冲调宽式变换器有以下几种: 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。

按谐振方式分, 有串联谐振式、并联谐振式和串并联谐振式; 按能量传递方式分, 有连续模式和不连续模式两种。凡是以脉冲宽度来调制的电子开关变换器都叫 PWM 变换器。

1.2 开关电源的结构形式

1.2.1 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

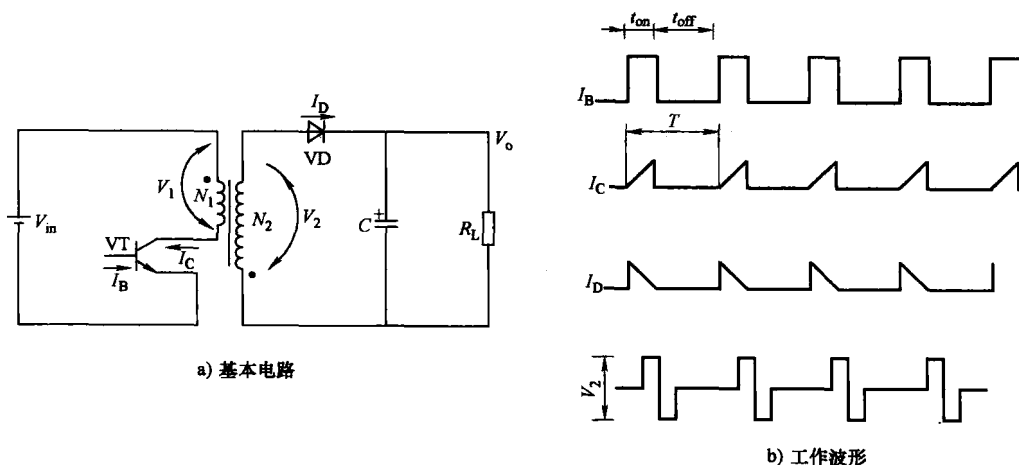


图 1-3 反激式变换电路

工作模式：一种是完全能量转换，即变压器在储能周期 t_{on} 中储存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} 中储存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。

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。当变压器一次侧储存的电能量释放到一定程度后，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 $V_o = (N_2/N_1)V_{in}D$ 。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。

1.2.2 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。

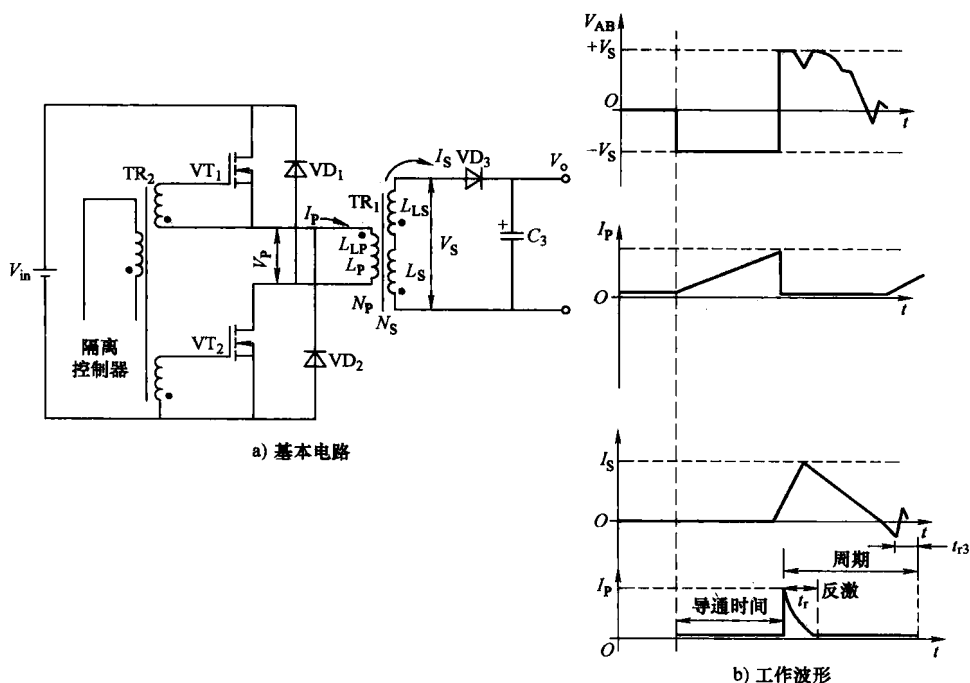


图 1-4 反激式双晶体管变换电路

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，储存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 ($n = N_p / N_s$)，储存在二次绕组的漏感 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，储存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，储存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，变压器一次绕组中储存过多的电能，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。

1.2.3 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。

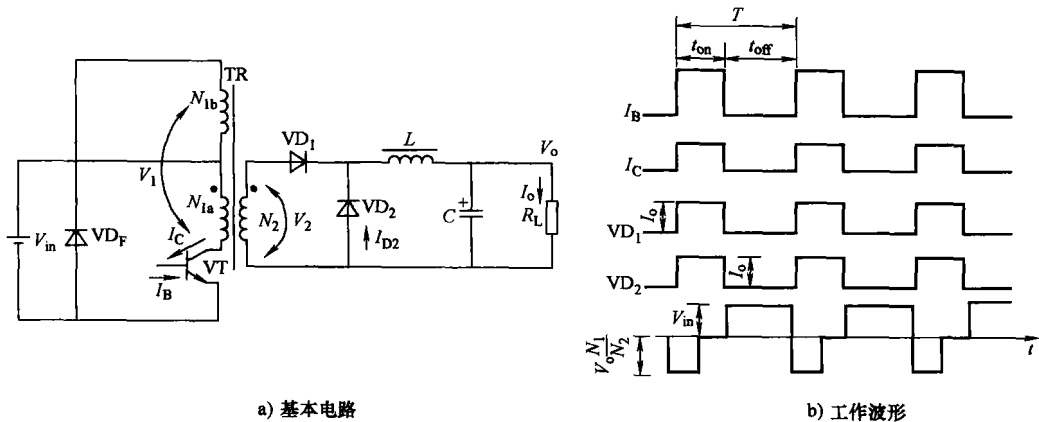


图 1-5 正激式单晶体管变换电路

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。

1.2.4 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 已经储存了电能，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

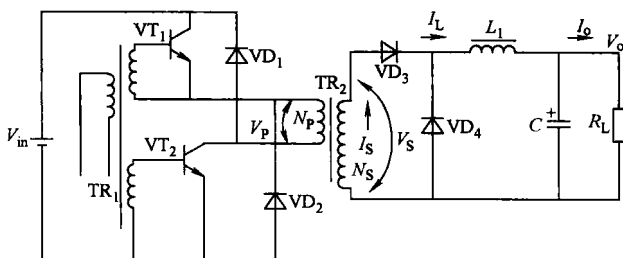


图 1-6 正激式双晶体管变换电路

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。

1.2.5 半桥式变换电路

为了减小开关晶体管的电压应力，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储存的电能足够大，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。

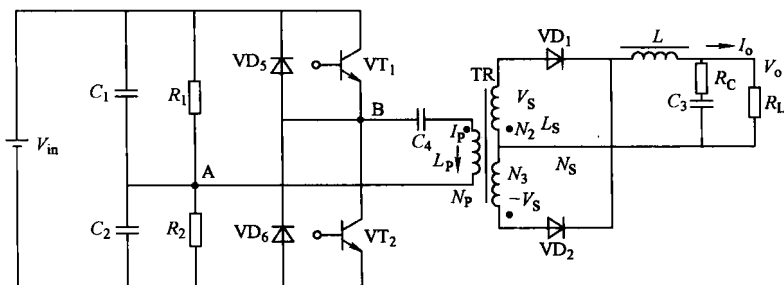


图 1-7 半桥式变换电路

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，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 。

1.2.6 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 V_{in} 电压的作用下趋向导通，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。

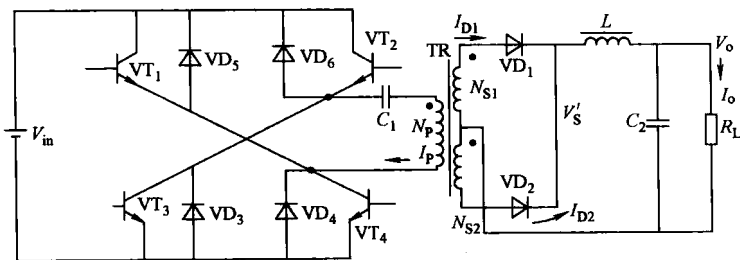


图 1-8 桥式变换电路

1.2.7 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。

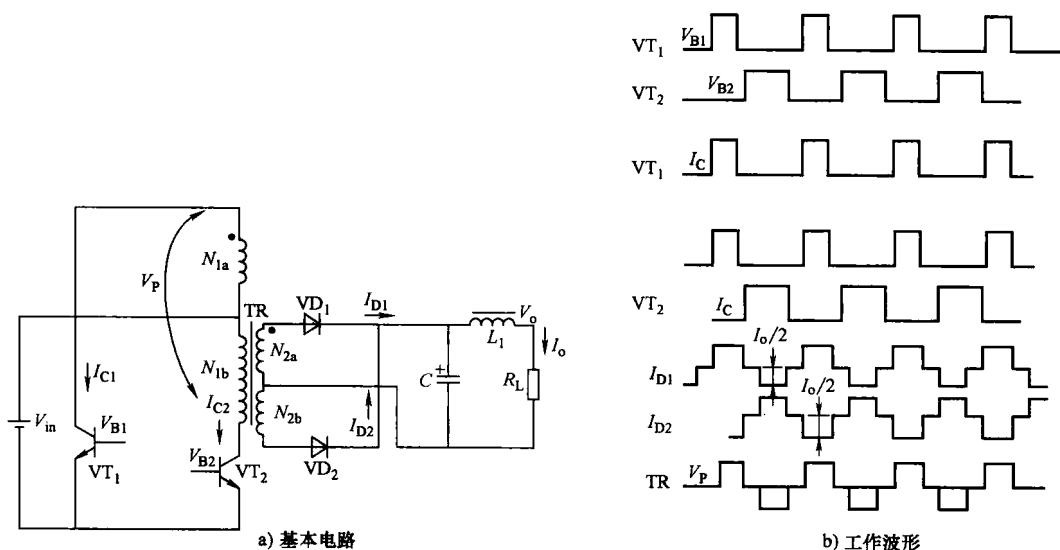


图 1-9 推挽式变换电路

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。 VT_1 的集电极电压上升，通过变压器绕组 N_{1a} 、 N_{1b} 的耦合， VT_2 的集电极电压下降。当 VT_2 的集电极电压下降到零时， N_{1a} 所储存的电能反馈到电源 V_{in} 中去。在反馈时，也反激到二次侧，使 VD_2 导通，将电能送到负载上。在运行中，如果 VT_1 、 VT_2 都处于截止状态，那么这段时间称为死区时间。在此期间，扼流圈 L_1 有一段保持电流时间，这时电流流向负载。二次侧的两个绕组和两只整流二极管形成一个完整的回路。推挽式隔离变换电路与其他形式的变换电路基本相同，但与正激式变换电路不同的是，它用两只管子进行推挽，变压器采用中心抽头连接，二次侧也是两相半波整流。因此，它相当于两个正激式变换电路工作的形式。这类变换电路比较复杂，尤其是变压器的一次和二次侧都需要两个绕组，但是它的利用率较高，效率高，输出纹波电压小，适合用于百瓦级至千瓦级的开关电源中。

推挽式变换电路由于使用两只晶体管，有时也会出现偏磁现象，出现这一现象是由两只开关晶体管的储存时间和开关时间的差异所致。加在变压器上的正、负电压的持续时间不同，经过几个周期的积累，就会出现单绕组励磁饱和现象和所谓的偏磁现象。在选用晶体管时，尽量使两只管子的技术参数保持一致。其次，在设计时，它的工作频率应小于 100kHz。

1.2.8 RCC 变换电路

RCC 变换电路是节流式阻尼变换电路，是一种自激式振荡电路，它的工作频率随着输入电压的高低和输出电流的大小而变化，因此在高功率、大电流场合，它的工作不很稳定，只适用于 50W 以下的小功率场合。但其结构简单，成本低，制作、调试容易，因此，有一定的应用价值。它的工作原理是这样的（见图 1-10）：当晶体管 VT 截止时，变压器一次侧所积蓄的电能耦合到二次绕组 N_2 ，如果 N_2 上端为正，则二极管 VD 导通，流过 VD 的电流

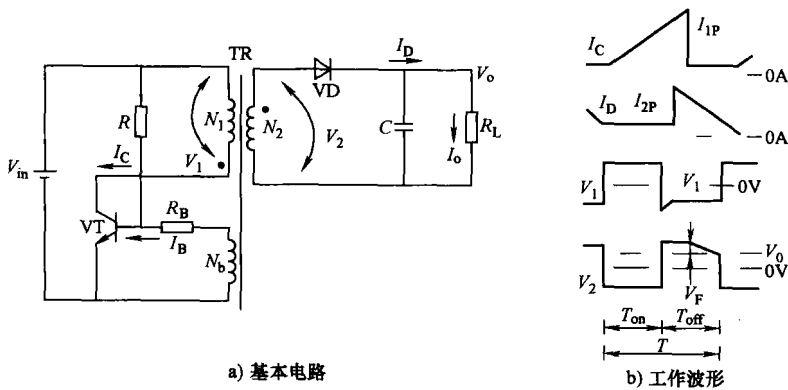


图 1-10 RCC 变换电路

I_D 经 C 滤波后向负载 R_L 供电。变压器一次绕组 N_1 的蓄能逐渐减小，电源电压 V_{in} 通过绕组 N_b 和电阻 R_B 不停地反向供电，再加上 N_b 受二次漏感的影响和 N_2 的反向激励作用，使 R_B 上的电压快速建立，建立的结果是 VT 由导通变为饱和。图中 I_C 与 I_D 是两个相反的锯齿波电流， V_1 和 V_2 也是两个相位差为 180° 的矩形脉冲电压。

1.3 开关电源元器件的特性与选用

无论哪一种变换电路，用的是哪一种结构形式的开关电源，所使用的元器件都是开关晶体管、电阻、电容、电感及磁性材料等。选用好元器件，是决定开关电源质量的关键。往往设计的开关电源在实验室中是成功的，一到生产线上进行规模生产时，就会出现各种问题。当然，有设计方面的，有工艺方面的，还有焊接方面的，但多数是元器件选用问题。元器件质量的差异是影响开关电源质量的一个重要原因。这里将讨论各种元器件的规格、特性及选用的原则。

开关电源中的功率开关晶体管是影响电源可靠性的关键器件。开关电源所出现的故障中约 60% 是功率开关晶体管损坏引起的。主电路中用作开关的功率管主要有双极型晶体管和 MOSFET 两种。随着绿色开关电源的发展，绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、双极型静电感应晶体管 (BSIT) 及联栅晶体管 (GAT) 等新型功率开关器件也在不断地涌现，开关电源的发展前景非常广阔。

1.3.1 功率开关晶体管的特性与选用

1. MOSFET 的特点及主要参数

现在 MOSFET 在电子电路中被广泛应用，是因为单晶硅的结面积较大，能实现垂直传导电流，使得电流的容量加大，焊接在 PN 结面的单晶硅具有高阻移动范围，提高了结区耐压量级，沟道电阻减小，开关速度提高，栅极电压不以漏源间隙增加而变化，所以漏源电压大大提高，极间电容减小。

MOSFET 分 P 沟道耗尽型、N 沟道耗尽型和 P 沟道增强型、N 沟道增强型 4 种类型。增强型 MOSFET 具有应用方便的“常闭”特性（即驱动信号为零时，输出等于零）。在开关电