

开关电源 实例电路

测试分析与设计

*Test analysis and Design
of Switching Power Supply Cases*

◎葛中海 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

开关电源实例电路 测试分析与设计

葛中海 主 编
陈 全 副主编

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书比较系统地介绍开关电源基础理论和应用实例，主要内容包括开关电源的基本理论（概述）、开关电源单元电路、自激式开关电源、他激式开关电源、低压 DC-DC 变换器、单片集成式开关电源及开关电源设计等知识。在书中，笔者提供许多开关电源实例，根据电路板反绘出原理图，结合关键节点的直流电压或交流波形，深入浅出地剖析了开关电源的工作原理，希望给读者以引领和启示。

本书面向实际需要，理论联系实际，通过大量具体的测试实验，通俗易懂地介绍开关电源的基础知识和特殊应用设计。

本书适用对象是相关领域与部门工程技术人员及相关专业大专院校师生、电子工程师，还有广大的电子爱好者。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

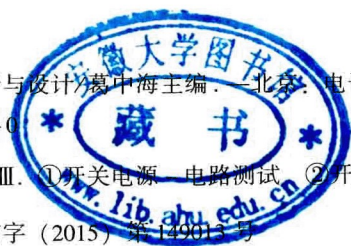
图书在版编目 (CIP) 数据

开关电源实例电路测试分析与设计/葛中海主编. —北京: 电子工业出版社, 2015.8

ISBN 978-7-121-26531-0

I. ①开… II. ①葛… III. ①开关电源—电路测试 ②开关电源—电路设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 149013 号



责任编辑：富 军

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市京南印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：16.75 字数：429 千字

版 次：2015 年 8 月第 1 版

印 次：2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前 言

随着电力电子技术的迅速发展，开关电源已广泛应用于计算机、通信、仪器仪表、工业加工和航天等领域。因此，从事开关电源学习和研究的高校师生，以及从事开关电源设计研发的工程技术人员，都迫切需要理论性、实用性强的学习资料。这便是我们向同行介绍本书的原因。

开关电源具有效率高、体积小、重量轻等显著特点，因此近来获得了迅速发展。目前，无论是民用领域的家电产品、办公设备，还是专业领域的各类电子仪器设备，其供电方式均以开关电源为主流。开关电源采用的变压器工作在高频状态，因此体积可以做得很小，功耗可以做到很低，开关电源效率可高达80%~90%，这是传统的线性稳压电源和可控整流电源无法比拟的。目前，世界各国正在加紧研制新型开关，包括新的理论、新的电路方案与新的功率器件。

开关电源的工作于开关状态，从原理上讲（相对于线性工作）是低损耗的，但半导体开关工作也存在着损耗，而且损耗随着开关频率成比例地增加。因此，需要尽可能地降低电源电路的损耗。

另一方面，开关电源都采用变压器、电感和电容元件，开关频率的提高，可允许这些元件参数降低、体积变小。电子设备的小型化、轻量化，关键是供电电源的小型化、轻量化。因此，电源的小型化对整个设备的体积影响至关重要。

然而，随着开关高频的提高，这些元件的损耗也会增加。同时，半导体器件高速开关时，电路中存在分布电感与电容，会使二极管蓄积电荷的影响产生浪涌电压与噪声，不但影响周围电子设备的工作，而且也使电源本身的可靠性显著降低……所有这些，都需要工程人员具有扎实的开关电源理论和丰富的实践经验，具体问题具体分析，找出解决问题的最佳方案。

参与本书编写的主要作者都是多年从事职业教育与电子技术工作的老师，具有丰富的职业教育和电子技术工作经验。第1章由中山市技师学院陈全老师编写；第2章由中山市技师学院梁镇杰老师编写；第3章由中山市技师学校颜绮虹老师编写；第4章由中山市技师学院尹细妹老师编写，第5、6章由珠海市高级技工学校张倩老师编写。第7章由中山市技师学院葛中海老师编写，同时任主编，负责全书的策划、组织和定稿。

由于作者能力有限，加之时间紧迫，缺点和错误在所难免，恳请各界读者对书中的缺点和错误提出批评、指正。



为了使半导体元器件的编号符合国家标准且保持全书的统一性，实例电路图中半导体元器件的编号做以下更改：二极管以“D”打头的均改为以“VD”打头，三极管以“T”或“Q”打头的均改为以“VT”打头。

若读者对本书有什么意见建议，可以与主编葛中海老师直接联系，QQ1278685727，新浪博客 <http://blog.sina.com.cn/gezh>。本书绝大部分开关电源板更详尽的测试分析及多角度照片，都将可能在其新浪博客中找到，以期弥补本书的遗憾与不足。

编者

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 稳压电源的比较	1
1.1.1 线性电源的结构与特点	1
1.1.2 开关电源的结构与特点	3
1.2 开关电源的基本构成	5
1.2.1 开关电源的基本构成	5
1.2.2 开关电源的稳定度	5
1.3 开关电源的分类	6
1.3.1 按开关管的激励脉冲方式分类	6
1.3.2 按转换器的电路结构方式分类	8
1.3.3 按开关管的脉冲调制方式分类	17
第 2 章 开关电源的单元电路	19
2.1 开关电源的基本单元电路	19
2.1.1 开关电源的输入电路	19
2.1.2 开关电源的功率转换电路	32
2.1.3 开关电源的输出电路	35
2.1.4 开关电源的保护电路	40
2.2 开关电源的特殊单元电路	42
2.2.1 消磁电路	43
2.2.2 功率因数校正 (PFC) 电路	44
第 3 章 自激式开关电源的原理与应用	49
3.1 自激式开关电源的工作原理	49
3.1.1 概述	49
3.1.2 自激式开关电源的工作原理	50
3.1.3 自激式开关电源简易电路	53
3.2 自激式开关电源的应用	58
3.2.1 三星 USB 手机充电器型 i899 (仿品)	58
3.2.2 诺基亚 USB 手机充电器 AC-8C	65
3.2.3 惠普 HP1018 打印机开关电源	72
3.2.4 兄弟牌 MFC7420 多功能一体机开关电源	79



3.2.5	爱普生 B161B 打印机开关电源	85
3.2.6	爱普生 LQ—300K 打印机开关电源	91
3.3	自激式开关电源有关问题的探讨	95
第 4 章	他激式开关电源的原理与应用	104
4.1	他激式开关电源的类型与工作原理	104
4.1.1	概述	104
4.1.2	反激式开关电源的工作原理	105
4.2	反激式开关电源的应用	111
4.2.1	手机充电器	111
4.2.2	LED 广告牌开关电源	126
4.2.3	电流模式控制器 NCP1200	134
4.2.4	佳能打印机开关电源	139
4.2.5	戴尔笔记本电脑适配器	153
4.2.6	惠普笔记本电脑电源适配器	158
4.3	半桥式开关电源	163
4.3.1	脉宽调制型控制器 TL494	163
4.3.2	半桥式开关电源	165
4.4	反激式开关电源有关问题的探讨	171
第 5 章	非隔离型 DC—DC 转换器	176
5.1	Buck 转换器	176
5.1.1	Buck 转换器基础	176
5.1.2	Buck 转换器的应用	179
5.2	Boost 转换器	190
5.2.1	Boost 转换器基础	190
5.2.2	Boost 转换器的应用	191
第 6 章	单片集成式开关电源	201
6.1	单片集成式开关电源的概述	201
6.1.1	单片集成式开关电源的主要类型	201
6.1.2	单片集成式开关电源的工作原理	203
6.2	单片集成式开关电源的应用	204
6.2.1	三星手机充电器 (TAD037CBC) 开关电源	204
6.2.2	机床稳压电源	210
第 7 章	开关电源电路设计	216
7.1	自激式开关电源的设计	216
7.1.1	自激式开关电源	216
7.1.2	技术指标	219
7.1.3	占空比与工作频率的选定	220

7.1.4	直流输入电压 U_1 的确定	220
7.1.5	一次绕组峰值电流、匝数比及一次绕组电感量的确定	220
7.1.6	磁心的选用及匝数 N_1 、 N_2 和 N_3 的确定	221
7.1.7	变压器的设计	222
7.1.8	极限工作参数	227
7.1.9	开关管的电压与电流	229
7.1.10	输出二极管的选用	229
7.1.11	输出电容的选用	230
7.1.12	控制电路的选用	231
7.2	反激式开关电源的设计	232
7.2.1	反激式开关电源的电路结构	232
7.2.2	技术指标	234
7.2.3	占空比、频率 f 和输出直流电压的确定	234
7.2.4	一次绕组峰值电流、匝数比及一次绕组电感量的确定	234
7.2.5	绕组匝数的确定及有关参数的验证	235
7.2.6	功率 MOSFET 的选用	239
7.3	正激式开关电源的设计	242
7.3.1	技术指标	243
7.3.2	工作频率的确定	243
7.3.3	最大导通时间的确定	243
7.3.4	变压器二次绕组输出电压和匝数比的计算	244
7.3.5	变压器二次绕组输出电压的计算	245
7.3.6	变压器二次绕组输出电压的计算	246
7.3.7	恢复电路设计	248
7.3.8	MOSFET 的选用	250
7.3.9	恢复二极管的选用	252
7.3.10	输出二极管的选用	252
7.3.11	变压器参数的计算	254
7.3.12	输出扼流圈的计算	254
	参考文献	257

第 1 章

概 论

开关电源不同于线性电源，前者调整管工作在通、断状态，后者调整管工作在线性状态。开关电源通过控制调整管的通、断时间实现稳压。开关电源的优点是体积小、重量轻、功耗小、稳压范围宽，效率可高达 80% ~ 90%。调整管功率损耗小，散热器也随之减小。开关电源工作频率在几十千赫兹甚至几百千赫兹，滤波电感、电容元件可用较小的容量，允许的环境温度也可以大大提高，广泛应用在各种电子设备中。本章主要介绍开关电源的基本构成、分类及工作原理，让读者对开关电源有一个初步的认识。

1.1 稳压电源的比较

电子设备离不开电源。电源供给电子设备所需要的能量。电源的性能、质量直接影响着电子设备的安全可靠运行，故此对电子设备电源性能、质量的要求也越来越高。现有的电源主要有两大类：串联线性稳压电源（简称线性电源）和开关稳压电源（简称开关电源）。这两类电源各具特色而被广泛应用。

1.1.1 线性电源的结构与特点

线性电源的组成框图及输出波形如图 1-1 所示。

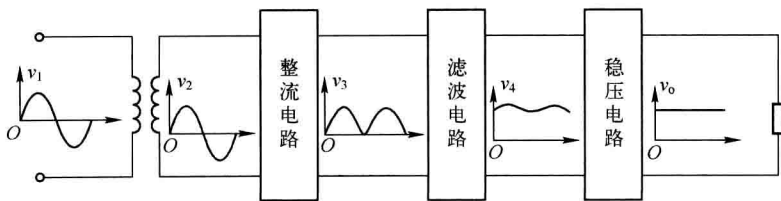


图 1-1 线性电源的组成框图及输出波形

线性电源通常都是由电网所提供的交流电，经过变压、整流、滤波和稳压环节而得到。其各个部分电路的作用如下：

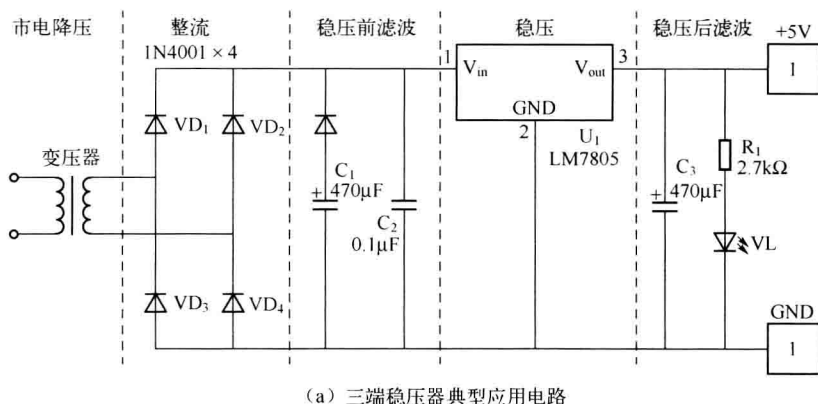
① 电源变压器——将 220V 电网电压转换为整流电路所需要的交流电压值，而少部分电路采用电容降压，如遥控电风扇电路。

② 整流电路——将交流电压转换为脉动直流电压。常用的整流电路有半波整流电路、全波整流电路和桥式整流电路。

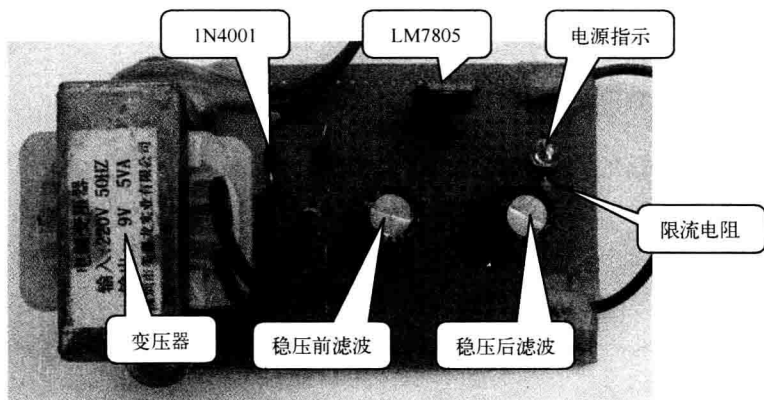
③ 滤波电路——将脉动直流电压转换成较为平滑的直流电压。线性电源中常用的滤波电路有电感滤波、电容滤波和阻容滤波，其中最常用的是电容滤波。

④ 稳压电路——将直流电源的输出电压稳定，基本不受电网电压或负载的影响。在线性电源中常用的稳压电路有二极管稳压、串联稳压。其中，串联稳压有现成的集成电路，如固定电压输出的集成电路有 $LM78 \times \times$ ， $LM79 \times \times$ 等，可调电压输出的集成电路有 $LM317$ 和 $LM337$ 等。

图 1-2 为包含市电降压、整流、滤波和稳压 4 个功能模块的线性稳压电源。



(a) 三端稳压器典型应用电路



(b) 实物图

图 1-2 4 个功能模块的线性稳压电源

线性电源的优点是稳定性好、瞬态响应速度快、可靠性高、输出电压精度高和输出纹波电压小；缺点是工作频率低，所采用的工频变压器、滤波器的体积和重量都较大。调整管工作在线性状态，功耗大、效率低，需要加装散热器。在一般情况下，线性电源效率均不会超过50%，但它优良的输出特性，在对电源性能要求较高的场合仍得到了广泛的应用。

1.1.2 开关电源的结构与特点

在 AC - DC 电源转换中，市电均经整流变为高压直流（DC），再经 DC - DC 转换成负载所需的低压直流（DC），因此 DC - DC 转换器是开关电源的组成核心，故 DC - DC 开关电源也称为 DC - DC 转换器（注：因 DC - DC 开关电源的调整管工作在通（ON）与断（OFF）状态，故也称为**开关管**；又因调整管的主要功能是进行功率转换，故也称为**功率管**或**功率开关管**）。

开关电源工作原理的实质是通过改变电路中调整管的导通时间来改变输出电压（或电流）的大小，以达到维持输出电压（或电流）稳定的目的。

DC - DC 转换器就是重复通/断开关，把直流电压（电流）转换成高频方波电压（电流），再经整流平滑变为直流电压（电流）输出。DC - DC 转换器由半导体开关、整流二极管、平滑滤波电抗器和电容等基本元件组成。当输入、输出间需要进行电气隔离时，可以采用变压器，把高频方波电压（电流）通过变压器传送到输出侧。构成 DC - DC 转换器的基本元器件如图 1-3 所示。图中， U_1 为整流后不稳定的直流电压； U_0 为经过斩波的输出电压；S 为开关。

通过提高开关频率，滤波电感、开关变压器等磁性器件，以及滤波电容等都可以小型轻量化。对于 DC - DC 转换器，加在开关 S 两端电压 U_s 的波形近似为方波，而通过电流 I_s 的波形近似为三角波或有台阶的三角波（见第 7 章，有台阶的三角波也可称为梯形波），如图 1-4 所示。其占空比定义为

$$D = \frac{t_{\text{ON}}}{T} = \frac{t_{\text{ON}}}{t_{\text{ON}} + t_{\text{OFF}}} \quad (1-1)$$

式中， T 为开关 S 通断周期； t_{ON} 为开关 S 导通时间； t_{OFF} 为开关 S 截止时间。

DC - DC 转换器的开关波形（见图 1-4）控制占空比的方法有保持工作周期 T 不变、控制开关通/断时间的脉宽调制（PWM）^①、保持导通时间 t_{ON} 不变、改变工作周期 T 的频率调制（PFM）^②。但在开关频率较低时，频率调制（PFM）方式需要较大的隔离变压器与输入/输出滤波器，这样既不经济，也使其体积过大，现实中难以接受，故这种工作方式的开关频率要足够高。

开关电源与线性电源相比具有较多的优点，见表 1-1。

① PWM 是“Pulse Width Modulation”的英文缩写，指脉冲宽度调制，简称脉宽调制。

② PFM 是“Pulse Frequency Modulation”的英文缩写，指脉冲频率调制，简称频率调制。

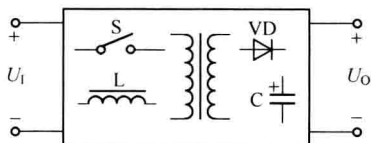


图 1-3 DC-DC 转换器构成的基本元器件

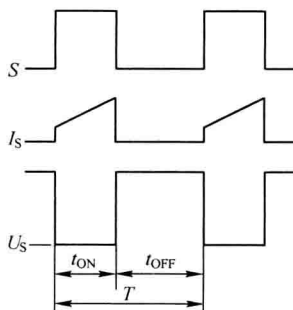


图 1-4 DC-DC 转换器的开关波形

表 1-1 开关电源的主要优点

序号	优点	描述
1	功耗小，效率高	开关管工作在开关状态，功率损耗小，效率可高达 80%~90%，质量好的可以达到 95% 甚至更高，而线性电源的效率只有 50% 甚至更低
2	体积小，重量轻	① 开关管工作在高频状态，只需要较小体积的变压器就能传输较大的能量； ② 开关管损耗小，散热器也随之减小或干脆不用； ③ 开关频率在几十千赫兹以上，是线性电源的 1000 倍，整流后的滤波效率也几乎提高 1000 倍，故滤波电感、电容的容量和体积都大为减小；同时，允许的环境温度也大大提高
3	适应电压范围宽	当输入电压或负载变化引起输出电压变动时，开关电源能通过调节脉冲宽度、脉冲频率或同时改变两者自适应调整，在电网电压变化较大的情况下，仍能保证稳定的输出电压。因此开关电源的稳压范围宽、稳压效果好及适用领域广
4	电路形式多样	开关电源有自激式和他激式、有调宽型和调频型、有隔离型和非隔离型等

开关电源虽然有很多优点，但也存在一些问题影响着开关电源的生产或应用，见表 1-2。

表 1-2 开关电源的主要缺点

序号	缺点	描述
1	电磁干扰大	调整管工作在开关状态，电流通过有关元件时会产生较大尖峰干扰和谐振噪声，这些噪声干扰频带宽、谐波大、电磁干扰强。如果不采取一定的措施进行抑制、消除和屏蔽，就会严重地影响整机的正常工作或窜入电网，干扰附近的其他电子设备、通信设备和家用电器的正常工作
2	纹波和噪声大	调整管工作在开关状态，产生的尖峰干扰和谐波虽经整流、滤波电路，但输出电压中的纹波和噪声仍然比线性电源大得多
3	瞬态响应慢	输出对输入的瞬态响应一般为 ms 级，对负载变化的瞬态响应主要是由 LC 滤波器特性决定的。线性稳压电源输出对输入的瞬态响应几乎是即时性的，瞬态响应由反馈放大器的频率特性及滤波电容的容量决定
4	功率因数低	直接对交流电网进行全波整流、电容滤波获得直流电压，交流电压与电流之间存在相位差，且输入电流不是正弦波，谐波含量很高。电流谐波的产生一方面使谐波噪声含量提高，另一方面使功率因数降低
5	对元器件要求高	在一定频率下，开关电源的效率与工作频率成正比。然而，当频率提高后，对整个电路中的元器件，如功率开关管、开关变压器、储能电感、滤波电容等又有了新的、更高的要求

1.2 开关电源的基本构成

1.2.1 开关电源的基本构成

开关电源的基本构成如图 1-5 所示。图中， U_1 为市电整流滤波后的直流电压， U_0 为转换后的直流输出电压 DC-DC 转换器用于功率转换，是开关电源的核心部分，此外还有启动、过流和（或）过压保护、噪声滤波器等组成部分。

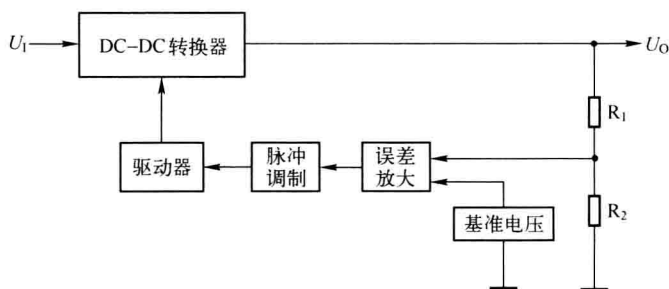


图 1-5 开关电源的基本构成

反馈回路检测输出电压并与基准电压比较，通过误差放大器放大，经脉冲宽调制电路和驱动器控制半导体的通、断时间比，从而调整输出电压或电流的大小。

1.2.2 开关电源的稳定度

1. 稳定度

稳定度是指输出电压随输入电压或负载变化的稳定程度，也称**电压调整率**。开关稳压电源（简称开关电源）的稳定度比串联线性稳压电源（简称线性电源）低，对于输入电压的变化，后者的输出几乎不变，而前者的变化比后者大 10^3 倍左右。

在如图 1-6 所示的开关电源中，由于反馈放大器的作用，输出电压与输入电压变化之比为

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta U_1} = \frac{1}{1+A}$$

式中， A 为放大器的增益，其中包含电阻分压器（ R_1 和 R_2 ）引起的衰减量。若 A 设为 1000，则 $\Delta U_0/\Delta U_1 = 10^{-3}$ ，这意味着输入电压变化 10V，输出电压就要变化 10mV。若在相同情况下，对于线性电源，输出电压只变化 10 μ V。

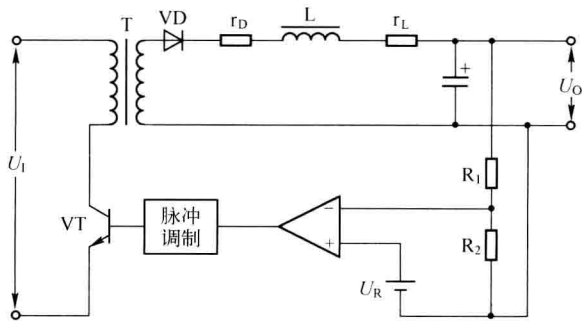


图 1-6 开关电源电路

2. 输出阻抗

开关电源的输出阻抗为

$$R_o \approx \frac{r_D + r_L}{1 + A}$$

式中, r_D 为整流器的等效(串联)电阻, r_L 为电抗器 L 的直流电阻。输出阻抗虽因整流器中二极管的额定电流不同而异, 但二极管等效电阻 r_D 为几十毫欧姆, 电抗器 L 的直流电阻 r_L 也与此相近。若 $r_D = 25\text{m}\Omega$, $r_L = 25\text{m}\Omega$, $A = 1000$, 则输出阻抗 R_o 为 $50\mu\Omega$, 在相同反馈放大器增益时, 输出阻抗比线性电源低。

对于线性电源, 输出对输入的瞬态响应特性由调整管的 h_{ib} 决定。这里 h_{ib} 是指晶体管基极接地工作方式的输入反馈系数, 在工程实用时此值可忽略不计。然而, 对于开关电源, 输入的瞬态变化全部表现在输出端, 要减小这种变化, 却极大地影响着反馈放大器的增益与频率特性, 一般为 ms 数量级。在提高开关频率的同时, 反馈放大器的频率特性得到改善, 此问题也有可能得到解决。

负载变化线性电源的瞬态响应由反馈放大器的频率特性及输出滤波电容的容量与特性决定, 而对于开关电源, 瞬态响应主要由输出 LC 滤波器的特性决定, 因此可以用提高开关频率、降低输出滤波器 LC 乘积的方法来改善其瞬态响应特性。

1.3 开关电源的分类

开关电源的电路结构有很多种, 分类方法也很多, 常见的分类方式如图 1-7 所示。

1.3.1 按开关管的激励脉冲方式分类

无论何种开关电源, 调整管均工作在开关状态。驱动调整管的激励电压可为方波的脉宽调制电压, 也可为正弦波的谐振电压。开关电源按调整管的激励电压产生方式分为自激式和他激式。

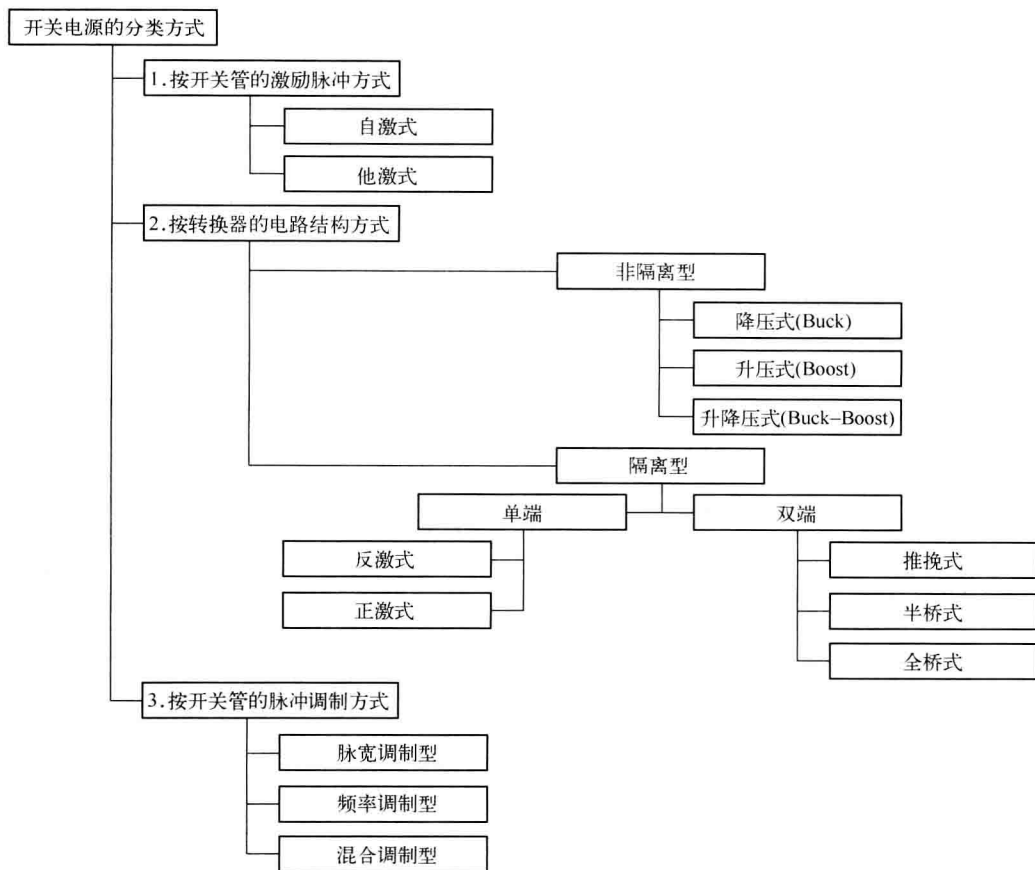


图 1-7 开关电源的常见分类方式

1. 自激式

自激式开关电源利用调整管、开关变压器辅助绕组构成正反馈环路，实现自激振荡，稳定电压输出。由于自激式开关电源的调整管兼作振荡管，因此无须专设振荡器。其脉冲信号是自激振荡形成的，是一种非固定频率的脉冲信号，随输入电压和负载变化而变化。在轻载时频率较高，在重载时频率较低，而在空载时会出现间歇振荡。

自激式开关电源本身具有一定的自保护功能，一旦负载过重，必然破坏反馈条件而停止振荡，从而保护了开关电源。由于其电流峰值高、纹波电流大，特别是在高功率、大电流工作时稳定性差，因此多用于 60W 以下的小功率场合。

2. 他激式

他激式开关电源电路的调整管不参与激励脉冲的振荡过程，有专设的振荡器产生脉冲控制调整管。例如，常用的集成电路 UC3842、NCP1200、TL494 等集成控制器能输出占空比可调的 PWM 脉冲。如今，许多集成控制器能根据输出功率的轻重自动升降开关频率，以便在不同负载状况下，均能保持优良的电源转换效率。

由于集成控制器把保护电路、控制电路、振荡电路和反馈信号检测电路集成于同一芯片上，使其抗干扰性能好，电路简洁、功能强大，能够完成振荡、稳压、过流、过压和欠



压等保护功能，是分立式开关电源所无法比拟的，因此近年来应用越来越广泛。

1.3.2 按转换器的电路结构方式分类

开关电源按转换器的电路结构方式分为非隔离型和隔离型。

1. 非隔离型 DC - DC 转换器

非隔离型 DC - DC 转换器输入和输出共地，适合低压直流电源转换的场合，包括**降压式**、**升压式**和**升降压式**。非隔离型 DC - DC 转换器的基本电路如图 1-8 所示。

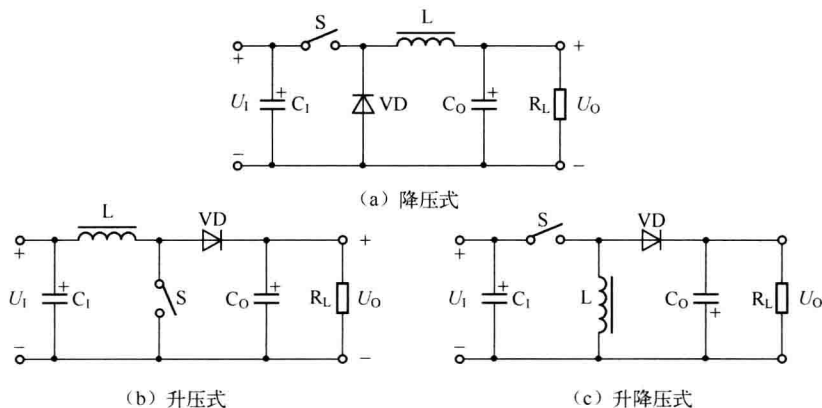


图 1-8 非隔离型 DC - DC 转换器的基本电路

在分析上述电路工作原理时，为简便起见，假定开关为理想开关，电路中各元件的内阻忽略不计。另外，输入电压为 U_1 、输出电压为 U_0 、电感和电容的值足够大，流经电感的电流与电容两端电压的纹波非常小。

1) 降压式转换器

(1) 工作原理

降压式转换器也称 Buck 电路。其工作原理分解电路如图 1-9 所示。当开关 S 闭合时，等效电路如图 1-9 (b) 所示，电流见图中标注；VD 因承受反压而截止，电感 L 励磁并存储能量，电容 C_0 开始充电。当开关 S 断开时，等效电路如图 1-9 (c) 所示，电流见图中标注；VD 承受正压而导通，电感 L 消磁并释放能量，电容 C_0 开始放电。在以上两种情形下，电感与负载的电流方向不变，但图 1-9 (b) 过程电感电流线性增加，图 1-9 (c) 过程电感电流线性减小。

在换能电路中，如果负载太轻或电感 L 数值太小，在 t_{ON} 期间储能不足，那么在 t_{OFF} 还未结束时能量已放尽，将导致输出电压为零，会出现阶梯台阶（参见第 5 章）。为了使输出电压的交流分量足够小， C_0 的取值应足够大。换言之，只有在 L 和 C_0 的取值足够大时，输出电压 U_0 和负载电流 I_0 才是连续的，L 和 C_0 的取值越大， U_0 的波形越平滑。

由于 I_0 是 U_1 通过开关管和 LC₀ 滤波电路轮流提供的，所以在通常情况下，脉动成分