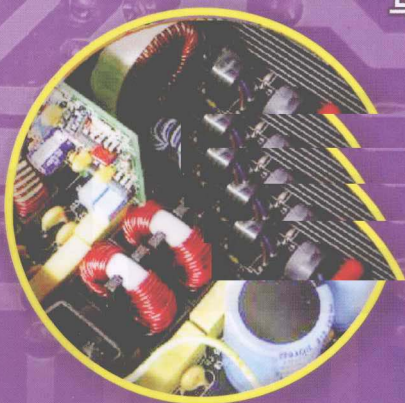


开关电源设计与应用系列书

开关电源

制作与调试

马洪涛 沙占友 周芬萍 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

开关电源设计与应用系列书

开关电源 制作与调试

马洪涛 沙占友 周芬萍 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 简 介

本书从实用角度出发,系统、深入地阐述了开关电源的制作流程,开关电源的拓扑结构,开关电源的控制电路,开关电源的辅助电路,电路板的布局、布线方法,高频变压器的制作,开关电源的调试与测试注意事项等,并详细介绍了3个不同类型开关电源的制作实例。本书为《开关电源设计与应用系列书》的分册,该丛书还包括《开关电源外围元器件选择与检测》、《开关电源优化设计》和《开关电源设计入门与实例解析》。

本书内容丰富,深入浅出,通俗易懂,具有科学性、先进性与很高的实用价值,可供电子和电气工程技术人员,仪器仪表及家电维修人员,大专院校师生及电子爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源制作与调试/马洪涛,沙占友,周芬萍著. —北京:中国电力出版社,2010.6

(开关电源设计与应用系列书)

ISBN 978-7-5123-0248-8

I. ①开… II. ①马…②沙…③周… III. ①开关电源—制作②开关电源—调试 IV. ①TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第052977号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年7月第一版 2010年7月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 6印张 174千字

印数 0001—3000册 定价 12.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

开关电源具有高效率、低功耗、体积小、重量轻等显著优点，其电源效率可达80%以上，比传统的线性稳压电源提高近一倍。开关电源的应用领域十分广泛，不仅包括仪器仪表、测控系统和计算机内部的供电系统，还适用于各种消费类电子产品。开关电源代表了稳压电源的发展方向，现已成为稳压电源的主流产品。目前，开关电源正朝集成化、智能化、模块化的方向发展。

开关电源技术涉及了模拟电子技术、数字电子技术、电力电子技术等多种学科。开关电源的设计与制作要求设计者具有丰富的实践经验，既要完成设计制作，又要懂得调试、测试与分析等。特别是在电路板的布局、布线方法及高频变压器的设计制作方面，要有足够的经验才能达到开关电源的性能指标。

鉴于国内介绍开关电源制作与调试的书籍还很少见，而广大读者迫切需要能全面、系统地掌握这方面的知识，为此，作者将近年来在教学与科研工作中积累的经验加以系统总结，并参考国内外厂家提供的最新资料后撰写成此书，以满足广大读者的需要。本书为《开关电源设计与应用系列书》的分册，该丛书还包括《开关电源外围元器件选择与检测》、《开关电源优化设计》和《开关电源设计入门与实例解析》。

本书融科学性、先进性、系统性、实用性于一体，深入全面的介绍了开关电源的制作过程、调试与测试注意事项。主要具有以下特点：

第一，重点突出。以开关电源制作为核心，全面、深入地阐述制作流程、关键元件制作、调试与测试方法、调试技巧及注意事项。

第二，内容丰富。既有开关电源制作的一般流程，也有不同类型开关电源的制作实例，还详细介绍了相关调试仪器的选择及使用

注意事项。

第三，具有很高的实用价值。本书不仅详细介绍了开关电源制作及调试的完整过程，还给出了开关电源测试、分析方法及技巧，便于读者触类旁通，举一反三，灵活应用。

第四，内容由浅入深，循序渐进，通俗易懂，图文并茂。

马洪涛副教授撰写了第一～五章和第八章。沙占友教授撰写了第九章，并完成了全书的审阅和统稿工作。周芬萍副教授撰写了第六章和第七章，并绘制了本书的全部插图。王晓君、睢丙东、安国臣、孟志永、于国庆、王彦朋等同志也参加了本书的撰写工作。

由于作者水平所限，书中的缺点和不妥之处在所难免，敬请广大读者指正。

作者

前 言

■ 第一章 开关电源的制作流程	1
第一节 开关电源的电路组成	1
第二节 开关电源的制作流程	2
■ 第二章 开关电源的拓扑结构	9
第一节 降压式变换器	9
第二节 升压式变换器	13
第三节 反激式变换器	15
第四节 正激式变换器	19
第五节 推挽式变换器	22
第六节 半桥式变换器	25
第七节 全桥式变换器	26
■ 第三章 开关电源的控制电路	28
第一节 自激振荡型 PWM 控制电路	28
第二节 TL494 型 PWM 控制电路	31
第三节 SG3525 型 PWM 控制电路	37
第四节 UC3842 型电流模式 PWM 控制电路	43
第五节 TOPSwitch-II 系列的 PWM 控制电路	54
第六节 TinySwitch 系列的 PWM 控制电路	61
■ 第四章 开关电源的辅助电路	68
第一节 输出电压反馈电路	68
第二节 尖峰电压吸收电路	73
第三节 EMI 滤波电路	75
第四节 整流滤波电路	76

第五节	过电压保护电路	79
第六节	过电流保护电路	81
第七节	尖峰电流抑制电路	82
■ 第五章	高频变压器的设计	84
第一节	高频变压器设计的基本方法	84
第二节	反激式开关电源的高频变压器设计	96
■ 第六章	印制电路板的设计	103
第一节	确定元器件的封装	103
第二节	元器件的布局	104
第三节	印制板的布线	108
■ 第七章	开关电源的调试	113
第一节	调试仪器设备的选择	113
第二节	调试方法与步骤	123
第三节	关键测试点的选择	124
第四节	调试中的注意事项	126
■ 第八章	开关电源的制作实例	129
第一节	60W 宽电压范围开关电源	129
第二节	三相电能表开关电源	142
第三节	72W 升压式 DC/DC 变换器	154
■ 第九章	开关电源的测试分析	164
第一节	开关电源测试技术	164
第二节	开关电源的性能测试	168
第三节	开关电源的测试技巧	170
第四节	开关电源的波形测试及分析	176
第五节	高频变压器磁饱和的检测方法	181
■ 参考文献		186

第一章

开关电源的制作流程

开关电源 (Switch Mode Power Supply, SMPS) 具有高效率、低功耗、体积小、重量轻等显著优点, 代表了稳压电源的发展方向, 现已成为稳压电源的主流产品。开关电源的设计与制作要求设计者具有丰富的实践经验, 既要完成设计制作, 又要懂得调试、测试与分析等。本章介绍开关电源组成及制作、调试所需的基本步骤和方法。

第一节 开关电源的电路组成

开关电源一般是指输入与输出隔离的电源变换器, 包括 AC/DC 电源变换器和 DC/DC 电源变换器, 也称为 AC/DC 开关电源和 DC/DC 开关电源。非隔离式 DC/DC 变换器也属于开关电源, 通常称之为开关稳压器。

1. AC/DC 开关电源的组成

AC/DC 开关电源的典型结构如图 1-1-1 所示。电源由输入电磁干扰 (EMI) 滤波器、输入整流/滤波电路、功率变换电路、PWM 控制器电路、输出整流/滤波电路和输出电压反馈电路组成。

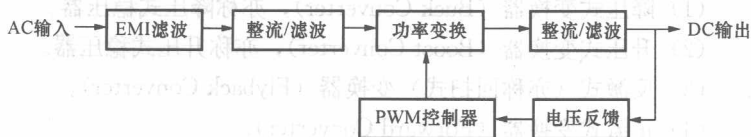


图 1-1-1 AC/DC 开关电源的典型结构

其中输入整流/滤波电路、功率变换电路、输出整流/滤波电路和 PWM 控制器电路是主要电路，其他为辅助电路。有些开关电源中还有防雷击电路、输入过压/欠压保护电路、输出过压保护电路、输出过流保护电路、输出短路保护电路等其他辅助电路。

2. DC/DC 开关电源的组成

DC/DC 开关电源的组成相对 AC/DC 开关电源要简单一点，其典型结构如图 1-1-2 所示。电源由输入滤波电路、功率变换电路、PWM 控制器电路、输出整流/滤波电路和输出电压反馈电路组成。当然，有些 DC/DC 开关电源也会包含其他辅助电路。

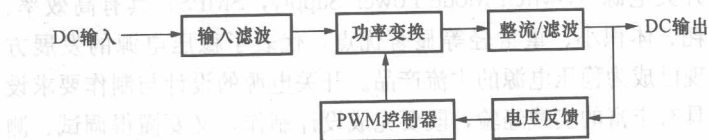


图 1-1-2 DC/DC 开关电源的典型结构

第二节 开关电源的制作流程

开关电源的设计与制作要从主电路开始，其中功率变换电路是开关电源的核心。功率变换电路的结构也称开关电源拓扑结构，该结构有多种类型。拓扑结构也决定了与之配套的 PWM 控制器和输出整流/滤波电路。下面介绍开关电源设计与制作一般流程。

1. 确定电路结构

无论是 AC/DC 开关电源还是 DC/DC 开关电源，其核心都是 DC/DC 变换器。因此，开关电源的电路结构就是指 DC/DC 变换器的结构。开关电源中常用的 DC/DC 变换器拓扑结构如下：

- (1) 降压式变换器 (Buck Converter)，亦称降压式稳压器。
- (2) 升压式变换器 (Boost Converter)，亦称升压式稳压器。
- (3) 反激式 (亦称回扫式) 变换器 (Flyback Converter)。
- (4) 正激式变换器 (Forward Converter)。
- (5) 半桥式变换器 (Half Bridge Converter)。
- (6) 全桥式变换器 (Full Bridge Converter)。

(7) 推挽式变换器 (Push-pull Converter)。

降压式变换器和升压式变换器主要用于输入、输出不需要隔离的 DC/DC 变换器中；反激式变换器主要用于输入、输出需要隔离的小功率 AC/DC 或 DC/DC 变换器中；正激式变换器主要用于输入/输出需要隔离的较大功率 AC/DC 或 DC/DC 变换器中；半桥式变换器和全桥式变换器主要用于输入/输出需要隔离的大功率 AC/DC 或 DC/DC 变换器中，其中全桥式变换器能够提供比半桥式变换器更大的输出功率；推挽式变换器主要用于输入/输出需要隔离的较低输入电压的 DC/DC 或 DC/AC 变换器中。

顾名思义，降压式变换器的输出电压低于输入电压，升压式变换器的输出电压高于输入电压。在反激式、正激式、半桥式、全桥式和推挽式等具有隔离变压器的 DC/DC 变换器中，可以通过调节高频变压器的一、二次匝数比，很方便地实现电源的降压、升压和极性变换。此类变换器既可以是升压型，也可以是降压型，还可以是极性变换型。在设计开关电源时，首先要根据输入电压、输出电压、输出功率的大小及是否需要电气隔离，选择合适的电路结构。

2. 选择控制电路

开关电源是通过控制功率晶体管或功率场效应管的导通与关断时间来实现电压变换的，其控制方式主要有脉冲宽度调制、脉冲频率调制和混合调制三种。脉冲宽度调制方式，简称脉宽调制 (Pulse Width Modulation)，缩写为 PWM；脉冲频率调制方式，简称脉频调制 (Pulse Frequency Modulation)，缩写为 PFM；混合调制方式，是指脉冲宽度与开关频率均不固定，彼此都能改变的方式。

PWM 方式，具有固定的开关频率，通过改变脉冲宽度来调节占空比，因此开关周期也是固定的，这就为设计滤波电路提供了方便，所以应用最为普遍。目前，集成开关电源大多采用此方式。为便于开关电源的设计，众多厂家将 PWM 控制器设计成集成电路，以便用户选择。开关电源中常用的 PWM 控制器电路如下：

(1) 自激振荡型 PWM 控制电路。

(2) TL494 电压型 PWM 控制电路。

(3) SG3525 电压型 PWM 控制电路。



(4) UC3842 电流型 PWM 控制电路。

(5) TOPSwitch-II 系列的 PWM 控制电路。

(6) TinySwitch 系列的 PWM 控制电路。

自激振荡型 PWM 控制电路通过启动电阻,利用高频变压器的正反馈绕组实现功率开关管的饱和导通,利用功率管的退饱和特性实现功率开关晶体管的关断。通过控制功率开关管基极电流大小实现脉冲宽度调制。具有结构简单、成本低廉的特点,适合在小功率的反激式开关电源中应用,例如各种电器设备的待机电源、手机充电器等。

TL494 是电压型 PWM 控制电路,具有固定振荡频率,它包含了开关电源所需的全部控制功能,广泛应用于推挽式、半桥式、全桥式拓扑结构的开关电源。内置功率晶体管可提供 500mA 的驱动能力,具有推或拉两种输出方式,适合驱动双极型功率开关晶体管。适合构成功率较大的开关电源。

SG3525 也是电压型 PWM 控制电路,是 SG3524 的改进产品,SG3524 的功能与 TL494 基本相同。SG3525 内置软启动电路,具有输入欠电压锁定功能,可实现逐个脉冲关断。其驱动输出级采用了推挽式电路结构,灌电流/拉电流能力超过 200mA,关断速度更快。不但能够驱动双极型功率开关晶体管,更适合驱动场效应功率管(MOSFET),以便获得更高的开关频率和电源效率。

UC3842 是电流型 PWM 控制电路,它具有引脚少、外围电路简单、性能优良、价格低廉等优点,适合构成小功率单端反激式开关电源,是目前单端 PWM 控制电路的一种优选型号。该电路具有欠电压锁定功能和大电流图腾柱式输出结构,适合驱动双极型功率管和场效应功率管(MOSFET)。其电流型控制模式,很容易实现对每个周期的峰值电流限制,能有效防止高频变压器的磁饱和,提高了开关电源的可靠性。

TOPSwitch-II 系列单片开关电源是将 PWM 控制系统的全部功能集成到三端芯片中。内含脉宽调制器、场效应功率管(MOSFET)、自动偏置电路、保护电路、高压启动电路和环路补偿电路,通过高频变压器即可实现输出端与电网完全隔离。外部仅需配整流滤波器、高频变压器、漏极钳位保护电路、反馈电路和输出电路,

即可构成反激式开关电源。

TinySwitch 系列单片开关电源是美国 PI 公司推出的一种高效率、小功率、低成本的四端单片开关电源专用 IC。因它所构成的开关电源体积很小,故英译名有“微型开关”之称。TinySwitch 系列比 TOPSwitch-II 系列三端单片开关电源增加了一个使能端,使用也更加方便、灵活。其控制系统实际上是采用跳过周期的方式实现稳压过程的,等效为脉冲频率调制器 (PFM)。该系列产品特别适合制作 10W 以下的微型开关电源或待机电源。

在设计开关电源时,要根据主电路的拓扑结构、输出功率的大小、电源的应用领域等选择合适的 PWM 控制电路。

3. 确定辅助电路

开关电源通常由输入电磁干扰 (EMI) 滤波器、整流滤波电路、功率变换电路、PWM 控制器电路、输出整流滤波电路等组成。其中功率变换电路是开关电源的主要电路,对开关电源的性能起决定作用。根据不同的拓扑结构,开关电源还需要一些辅助电路才能正常工作。有些辅助电路可能包含在主要电路环节当中。开关电源中常见的辅助电路如下:

- (1) 电压反馈电路。
- (2) 尖峰电压吸收电路。
- (3) 输入滤波电路。
- (4) 整流滤波电路。
- (5) 输出过电压保护电路。
- (6) 输出过电流保护电路。
- (7) 尖峰电流抑制电路。

其中电压反馈电路是各类开关电源都具有的辅助电路。尖峰电压吸收电路是反激型开关电源必需的辅助电路。输入滤波电路通常只在 AC/DC 变换器中出现。整流滤波电路包括工频 (50Hz) 整流滤波和高频整流滤波。自激振荡型本身就具有输出过电流保护特性。有时还需要开关电源具有防雷击保护电路,输入过电压、欠电压保护电路等。设计人员可以根据设计要求进行适当的取舍。

4. 整理电路原理图

开关电源的拓扑结构、控制电路和辅助电路确定以后,就可以

整理、绘制电路原理图。以便确定所有元器件的型号、参数及数量,完成各元件引脚之间的电路连接。电路原理图应按照信号流程和功能划分成不同区域,力求布线清晰、整洁,密度分配合理,信号流向清楚。然后确定所有元器件的封装,以便电路板设计时的元器件布局与布线。

5. 制作高频变压器

高频变压器的设计是制作开关电源的关键技术。在半桥式、全桥式和推挽式开关电源中,高频变压器通过的是交变的电流,不存在直流磁化问题,设计方法和工频变压器基本相同,只是采用的磁心材料不同,设计起来相对简单一些。正激式开关电源的高频变压器与全桥式有相同之处,但存在直流磁化问题,设计起来要复杂一些。因此有时会在高频变压器中增加去磁绕组,以便降低设计难度。反激式开关电源在小功率开关电源中应用最为普遍,但其高频变压器的设计也最为复杂。

反激式开关电源的高频变压器相当于一只储能电感,在固定的开关频率下,其储存的能量大小直接影响开关电源的输出功率。在设计反激式开关电源的高频变压器时,需要以下几个步骤:

- (1) 计算一次电感量 L_p 。
- (2) 选择磁心与骨架。
- (3) 计算一次绕组匝数 N_p 。
- (4) 计算二次绕组匝数 N_s 。
- (5) 计算气隙长度。
- (6) 检验最大磁通密度 B_m 。

首先要根据一次绕组的峰值电流 I_p 和开关电源的输出功率 P_o 计算一次电感量 L_p 。然后是选择磁心与骨架并确定相关参数。接下来依据选定的磁心截面积和磁路长度等参数计算一次匝数 N_p 。再根据一次和二次的变比值计算二次绕组匝数 N_s 。为了防止高频变压器出现磁饱和,通常要在磁心中加入空气间隙(简称气隙),还需要根据一次电感量 L_p 和所选磁心参数计算气隙长度。最后还要根据峰值电流 I_p 、一次绕组匝数 N_p 和磁心参数计算最大磁通密度 B_m ,检验是否满足磁心材料要求。在部分条件不能满足时,要重新选择磁心与骨架,进行计算和检验,直到满足设计要求为止。

6. 设计印制板

开关电源的印制板设计与一般电子线路的印制板设计既有相同之处，又有不同的特点。一般电子线路的印制板设计中提到的布局、布线及铜线宽度与通过电流的关系等原则，在开关电源的印制板设计中也同样适用。开关电源中除了常用标准封装的电阻、电容以及集成电路以外，还包含着大量非标准封装的电感、高频变压器、大容量电解电容、大功率二极管、三极管以及各种尺寸的散热器等元件。这些元件的封装要在印制板设计之前自行确定，可以根据厂家提供的外形尺寸或实际测绘确定。开关电源的印制板设计还要特别注意以下问题：

- (1) 元件布局问题。
- (2) 地线布线问题。
- (3) 取样点选择问题。

开关电源中的元件布局，重点考虑主电路关键元件。开关电源中输入滤波电容、高频变压器的一次绕组和功率开关管组成一个较大脉冲电流回路。高频变压器的二次绕组、整流或续流二极管和输出滤波电容组成另一个较大脉冲电流回路。这两个回路要布局紧凑，引线短捷。这样可以减小泄漏电感，从而降低吸收回路的损耗，提高电源的效率。

开关电源中的地线回路，不论是一次还是二次，都要流过很大的脉冲电流。尽管地线通常设计的较宽，但还会造成较大的电压降落，从而影响控制电路的性能。地线的布线要考虑电流密度的分布和电流的流向，避免地线上的压降被引入控制回路，造成负载调整率下降。

开关电源中取样点选择的选择尤为重要，在取样回路中，既要考虑负载电流产生的压降，也要考虑整流或续流电路产生的脉冲电流对取样的影响。取样点应该尽量选择输出端子的两端，以便得到最好的负载调整率。

7. 安装调试

安装前准备好各种元器件、常用的工具和材料。正确使用得心应手的工具，既可提高工作效率，又能保证装配质量。分立元件在安装前要全部测试。先安装体积小、高度低的电阻和二极管元件，然后是集成电路、晶体管、电容器等，最后安装较大尺寸的散热

器。注意有极性的电子元器件的极性标志。不同尺寸的引脚和焊盘应选用不同功率的电烙铁焊接,以保障焊接质量和可靠性。调试步骤按以下顺序进行:

- (1) 准备调试仪器。
- (2) 通电前检查。
- (3) 通电后观察。
- (4) 性能测试。

调试前准备好相关调试仪器,开关电源的调试仪器主要有隔离变压器、自耦调压器、交流电压表、交流电流表、直流电压表、直流电流表和双踪示波器。其中电压、电流表可用几块同型号的数字万用表代替。

电路安装完毕后,不要急于通电,首先要根据电路原理图认真检查电路接线是否正确,元器件引脚之间有无短路,二极管、三极管和电解电容极性有无错误等。然后连接相关测试仪器仪表,检查仪器仪表挡位是否正确,通电前确保自耦调压器触头处于足够低的输出电压位置,电路是否需要接入最小负载以及负载连接是否正确等。

电源接通后不要急于测量数据,应首先观察有无异常现象。调节自耦调压器触头,使输入电压逐渐升高,用示波器观测功率开关晶体管的集电极或漏极的电压波形,这一点最为重要。该电压波形可以反映出尖峰电压大小以及开关管是否饱和导通,是防止开关管损坏的最佳观测点。此外还要观察输入电流是否过大,有无冒烟,是否闻到异常气味,手摸元器件是否发烫等现象。

开关电源正常工作之后,可以进行性能测试。首先是稳压范围的测试,在轻载条件下,将输入电压从最小值开始逐渐升高到最大值,观察输出电压是否稳定。然后是负载特性的测试,在额定输入电压条件下,将负载电流从最小值开始逐渐升高到最大值,观察输出电压是否稳定。在最大负载时,将输入电压从最小值逐渐升高到最大值,观察输出电压变化情况。

在调试电路过程中要对测试结果做详尽记录,以便经深入分析后对电路与参数做出合理的调整。最后根据设计要求,还可对电源调整率、负载调整率、输出纹波、输入功率及效率、动态负载特性、过压及短路保护等性能参数做更为详细的测试。

开关电源的拓扑结构

开关电源的拓扑结构是指功率变换电路的结构,也就是 DC/DC 变换器的结构。拓扑结构不同,与之配套的 PWM 控制器类型和输出整流/滤波电路也有差异。拓扑结构也基本决定了开关电源的工作原理及输出特性。本章将对开关电源常用的拓扑结构及工作原理进行详细介绍,以便读者在设计、制作开关电源时选用。

第一节 降压式变换器

降压式变换器亦称 Buck 变换器,是最常用的 DC/DC 变换器之一。降压式 DC/DC 变换器能将一种直流电压变换成更低的直流电压。例如它可将 +24V 电源变换成 +15V、+12V 或 +5V 电源,并且在变换过程中的电源损耗很小,在分布式电源系统中经常会用到。

1. 降压式 DC/DC 变换器的拓扑结构

降压式 DC/DC 变换器的拓扑结构如图 2-1-1 所示。图中的开关 S 用来等效功率开关管, U_i 为直流输入电压, U_o 为直流输出电压, VD 为续流二极管, L 为输出滤波电感(也称储能电感), C 为输出滤波电容。当 S 闭合时除向负载供电之外,还有一部分电能储存于电感 L 和电容 C 中, L 上的电压为 U_L , 其极性是左端为正、右端为负,此时续流二极管 VD 截止。当 S 断开时, L 上产生极性为左端负、右端正的反向电动势,使得 VD 导通, L 中的电能继续传送给负载和电容 C。降压式 DC/DC 变换器在功率开关管导通时向负载传输能量,属于正激式 DC/DC 变换器。

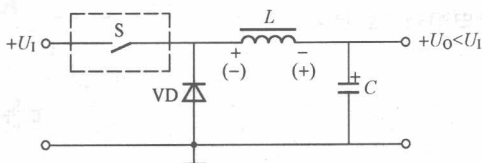


图 2-1-1 降压式 DC/DC 变换器的拓扑结构

2. 降压式 DC/DC 变换器的工作原理

降压式 DC/DC 变换器可用一只 NPN 型功率开关管 VT（或 N 沟道功率场效应管 MOSFET）作为开关器件 S，在脉宽调制（PWM）信号的控制下，使输入电压交替地接通、断开储能电感 L。降压式变换器的简化电路如图 2-1-2（a）所示，脉宽调制信号控制功率开关管 VT 的导通与截止。图 2-1-2（b）、（c）显示出了开关闭合、断开时的电流路径。

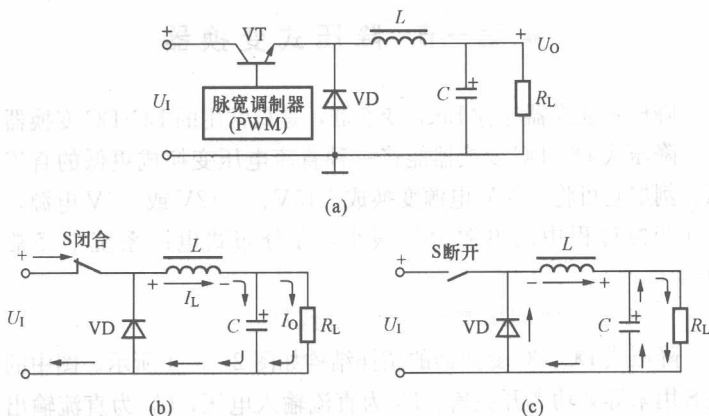


图 2-1-2 降压式 DC/DC 变换器的工作原理

（a）简化电路；（b）开关闭合时的电流路径；（c）开关断开时的电流路径

当开关闭合时续流二极管 VD 截止，由于输入电压 U_1 与储能电感 L 接通，因此输入—输出压差 $(U_1 - U_O)$ 就加在电感 L 上，使通过 L 的电流 I_L 线性地增加。在此期间除向负载供电之外，还有一部分电能储存在 L 和 C 中，流过负载 R_L 的电流为 I_O ，如图