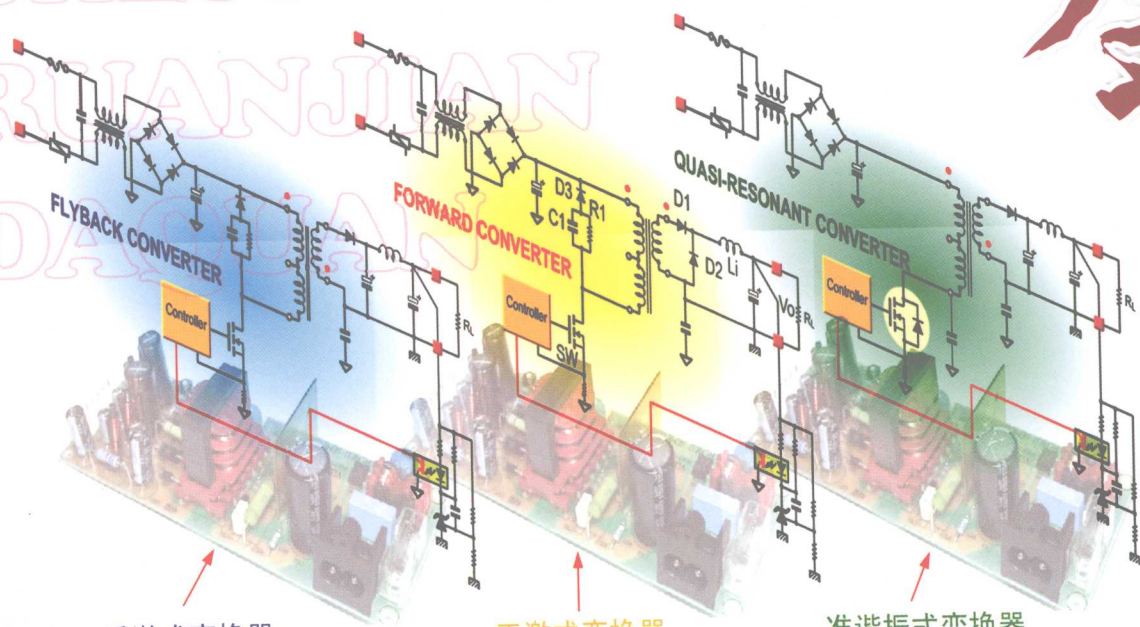


JICHENG
WENYA
DIANYUAN
SHIYONG
SHEJI
RUANJIAN
DAQUAN

集成稳压电源 实用设计软件

大全



反激式变换器

正激式变换器

准谐振式变换器

沙占友 王晓君 庞志锋 等编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

集成稳压电源 实用设计软件大全

沙占友 王晓君 庞志锋 等编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书全面深入地系统地阐述了开关电源、低压差和超低压差线性稳压器计算机辅助设计及仿真软件的应用技术。

全书共十四章。第一章为新型稳压电源及其设计软件综述。第二~六章分别介绍了当今国际上最流行的开关电源设计软件 PI Expert 6.6、PI Transformer Designer 6.6、SMPS Design Toolkit 1.6、StarPlug、VIPer 2.24 的应用。第七~十章阐述开关稳压器设计软件 Buck It Designer 1.1.8、LoPwrDC Designer 1.0、Swift Designer 3.51、SMS3.3/4.3/6.24/6.3、WEBENCH (在线设计软件) 的应用。第十一、十二章详细介绍开关电源计算机仿真软件 SwCAD III、POWER 4-5-6 的应用。第十三章介绍低压差稳压器设计软件 LDO-It 的应用。第十四章阐述稳压电源设计要点及测量技术。在配书光盘中, 包含了上述主要软件 (均为免费软件, 共 157MB), 是不可多得的珍贵软件工具库。本书所介绍的各种实用工具软件, 对广大读者开发新型稳压电源及电源模块具有重要参考价值。

本书题材新颖, 内容丰富, 深入浅出, 实用性强, 可供各类电子技术人员、高校师生和电子爱好者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

集成稳压电源实用设计软件大全/沙占友等编著. —北京: 中国电力出版社, 2008.8

ISBN 978-7-5083-7396-6

I. 集… II. 沙… III. 集成电路—稳压电源—计算机辅助设计—应用软件 IV. TN86-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 091845 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 485 千字

印数 0001—4000 册 定价 38.00 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

前言 | preface

稳压电源是各种电子设备的动力之源。目前,中、小功率稳压电源正向集成化、高效率、低功耗、小型化的方向发展。集成稳压电源主要包括两大类:开关电源和线性稳压电源。开关电源被誉为高效节能型电源,它代表着稳压电源的发展方向。开关电源主要包含隔离式 AC/DC 变换器、开关稳压器(即 DC/DC 变换器)。在线性稳压电源中,除普通线性稳压器之外,还有低压差线性稳压器(LDO)和超低压差稳压器(VLDO)。进入 21 世纪以来,新型集成化开关稳压器和低压差、超低压差稳压器正获得迅速发展和广泛应用,是电源管理半导体市场中增长最快的产品。其中,LDO 和 VLDO 更为便携式电子产品提供了一种极具竞争力的电源设计方案。

按照传统方法,依靠人工设计稳压电源不仅工作量大、效率低,而且因设计变量多、难于准确估算,使设计结果往往与实际情况相差较大,需要多次修正。近年来,随着电源技术的发展和计算机应用的普及,利用计算机设计开关电源、低压差和超低压差线性稳压器,已成为国际上电源领域的一项新技术。目前软件已成为优化开关电源设计的关键技术,利用软件能充分发挥高科技的优势,极大地减轻设计人员的工作量,在短短几分钟内即可完成各种集成稳压电源的最佳拓扑电路设计,为实现稳压电源的优化设计创造有利条件。与此同时,计算机仿真技术也成为开发稳压电源新产品的有力武器。利用计算机仿真技术能创建稳压电源的原型,使设计者不制作样机就能解决在设计稳压电源中可能遇到的技术问题,大大加快了研发新型稳压电源的进程。目前,软件已成为设计稳压电源设计的关键技术,设计稳压电源已不仅仅是专家的任务,任何设计人员都能设计出自己满意的电源。

本书主要有以下特点:

第一,全面、深入地阐述了单片开关电源、开关稳压器、低压差和超低压差线性稳压器设计及仿真软件的应用。所介绍的单片开关电源设计软件包括 PI 公司推出的 PI Expert 6.6、PI Transformer Designer 6.6,飞兆公司的 SMPS Design Toolkit 1.6,Philips 公司的 StarPlug 及 ST 公司的 VIPer 2.24。开关稳压器设计软件包括 Micrel 公司的 Buck It Designer 1.1.8, TI 公司的 Swift Designer 3.51、LoPwrDC Designer 1.0, NSC 公司的 SMS3.3/4.3/6.24/6.3, WEBENCH(在线设计)及安森美公司的 Forward 7.24、Flyback 7.24 和 Boost 7.24。仿真软件为 LT 公司的 SwCAD III, Ridley Engineering 公司的 POWER 4-5-6 Demo 及 NSC 公司的 WEBENCH(在线仿真)。低压差稳压器设计软件为 Micrel 公司的 LDO-It。

第二,所介绍软件的共同特点是它们均属于基于 PC 的设计软件,具有可视化图形界面,通过人机对话的交互式模式可帮助用户快速完成稳压电源的优化设计。

第三,全书以软件为主,内容由浅入深,循序渐进。例如,先介绍某种软件的入门知识,再阐述其使用方法、注意事项和设计实例,可满足不同层次读者的需要。

第四,选择目前在国际上最流行、最具代表性的稳压电源设计与仿真软件,具有很高的实用价值。

第五,在配书光盘中,包含了上述主要软件(共 157MB,均为免费软件),可供读者学习交流之用,是不可多得的珍贵软件工具库。

沙占友教授撰写了第一~三章、第七章和第十四章,与王晓君合撰了第八章,并完成了

全书的审阅和统稿工作。王晓君撰写了第四章和第五章。庞志锋撰写了第六章。孟志永、王保柱合撰了第九章。文环明、李春明合撰了第六章。安国臣、吴瑞红合撰了第十一章。刁彦华、安胜彪合撰了第十二章。张秀清、李欣雨合撰了第十三章。李学芝、沙江、韩振廷、张文清、宋怀文、陈庆华、王志刚、刘立新、张启明、刘东明、赵伟刚、宋廉波、刘建民、李志清、郑国辉同志也参加了本书的撰写工作。

本书撰写过程中得到了美国 Power Integrations 公司、NSC 公司、TI 公司、ON Semiconductor 公司、Ridley Engineering 公司、LT 公司、FAIRCHILD 半导体公司、Micrel 公司、Sipex 公司、Microchip 公司、MAXIM 公司、Catalyst 公司、MSKennedy 公司、AATI 公司、Austriamicrosystems 公司、ST (STMicroelectronics) 公司、荷兰 Philips 公司的大力支持，在此一并致谢！

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，欢迎广大读者指正。

作者

2008 年 6 月于河北科技大学

目 录 | contents

前 言

第一章 新型稳压电源及其设计软件综述	1
第一节 开关电源的基本原理与产品分类	1
第二节 开关稳压器的拓扑结构与产品分类	4
第三节 普通线性稳压器的基本原理与产品分类	10
第四节 低压差线性稳压器的基本原理与产品分类	12
第五节 稳压电源设计软件综述	17
第二章 PI 公司开关电源设计软件使用指南	21
第一节 PI Expert 6.6 设计软件简介	21
第二节 PI Expert 6.6 的选择指南及导航工具	28
第三节 PI Expert 6.6 的设计向导	34
第四节 开关电源的自动优化设计	39
第五节 反馈电路的设计	42
第六节 设计结果分析	49
第七节 PI Expert 6.6 设计软件的使用要点	53
第八节 PI Expert 6.6 设计软件的应用实例	54
第三章 PI 公司高频变压器设计软件使用指南	68
第一节 PI Transformer Designer 6.6 简介	68
第二节 PI Transformer Designer 6.6 使用入门	71
第三节 高频变压器的参数选择	73
第四节 设计高频变压器的注意事项	77
第五节 高频变压器设计实例	80
第四章 飞兆公司开关电源设计软件使用指南	87
第一节 SMPS Design Toolkit 1.6 设计软件简介	87
第二节 SMPS Design Toolkit 1.6 设计软件的辅助功能	95
第三节 SMPS Design Toolkit 1.6 设计软件使用入门	99
第五章 Philips 公司开关电源设计软件使用指南	111
第一节 Philips 公司单片开关电源产品简介	111
第二节 StarPlug 设计软件使用入门	116
第三节 StarPlug 设计软件的应用实例	119
第六章 ST 公司开关电源设计软件使用指南	125
第一节 VIPer 2.24 设计软件使用入门	125

第二节	VIPer 2.24 设计软件的仿真功能	133
第三节	VIPer 2.24 设计软件的应用实例	138
第七章	Micrel 公司开关稳压器设计软件使用指南	145
第一节	Buck It Designer 1.1.8 设计软件简介	145
第二节	Buck It Designer 1.1.8 设计软件使用入门	150
第三节	Buck It Designer 1.1.8 设计软件应用实例	156
第八章	TI 公司开关稳压器设计软件使用指南	162
第一节	LoPwrDC Designer 1.0 设计软件简介	162
第二节	LoPwrDC Designer 1.0 设计软件使用入门	166
第三节	LoPwrDC Designer 1.0 设计软件应用实例	171
第四节	Swift Designer 3.51 设计软件简介	175
第五节	Swift Designer 3.51 设计软件应用实例	179
第九章	NSC 公司开关稳压器设计软件使用指南	184
第一节	SMS3.3/4.3 设计软件使用入门	184
第二节	SMS3.3 设计软件的应用实例	190
第三节	SMS6.24/6.3 设计软件简介	198
第四节	SMS6.24 设计软件的应用实例	198
第十章	NSC 公司在线设计与仿真软件使用指南	204
第一节	WEBENCH 在线设计软件简介	204
第二节	WEBENCH 在线设计软件使用入门	206
第三节	开关稳压器在线设计与仿真的应用实例	213
第十一章	LT 公司开关稳压器仿真软件使用指南	222
第一节	SwitcherCAD III 仿真软件简介	222
第二节	SwCAD III 仿真软件使用入门	224
第三节	SwitcherCAD III 仿真软件的应用实例	231
第十二章	安森美公司开关稳压器设计与仿真软件使用指南	240
第一节	POWER 4-5-6 设计与仿真软件简介	240
第二节	POWER 4-5-6 设计与仿真软件的使用入门	243
第三节	对开关电源进行大信号波形仿真的方法	259
第四节	POWER 4-5-6 软件的应用实例	262
第十三章	Micrel 公司低压差稳压器设计软件使用指南	268
第一节	低压差线性稳压器设计软件的分类	268
第二节	LDO-It 设计软件使用入门	270
第三节	LDO-It 设计软件的应用实例	276

第十四章	稳压电源设计要点及测量技术	279
第一节	单片开关电源的设计要点	279
第二节	开关稳压器的设计要点	283
第三节	普通线性稳压器的设计要点	286
第四节	低压差线性稳压器的设计要点	289
第五节	开关电源的测量技术	296
参考文献		300
配书光盘目录		301

第一章

新型稳压电源及其设计软件综述

Chapter 1

本章首先介绍新型开关电源及 DC/DC 变换器的基本原理(含拓扑结构)与产品分类,然后分别阐述普通线性稳压器、低压差线性稳压器的工作原理与产品分类,最后对各种稳压电源设计软件加以综述。

第一节 开关电源的基本原理与产品分类

开关电源已有几十年的发展历史。1955 年发明的自激推挽式晶体管单变压器直流变换器,率先实现了高频转换控制功能;1957 年发明的自激推挽式双变压器、1964 提出的无工频变压器式开关电源设计方案,有力地推动了开关电源技术的进步;1977 年脉宽调制(PWM)控制器集成电路的问世,1994 年单片开关电源的问世,更为开关电源的推广和普及创造了条件。开关电源工作在开、关状态,开关频率可达几百千赫兹至几兆赫兹。目前,开关电源正朝着单片集成化、高效节能、安全环保、短、小、轻、薄的方向发展。各种新技术、新工艺和新器件如雨后春笋,不断问世,开关电源的应用也日益普及。

一、开关电源的基本原理及组成

1. 开关电源的基本原理

开关电源按控制原理来分类,有以下 3 种工作方式:

(1) 脉宽调制(Pulse Width Modulation, 简称 PWM)式:开关周期为恒定值,通过调节脉冲宽度来改变占空比,实现稳压目的。其核心是脉宽调制器。

(2) 脉频调制(Pulse Frequency Modulation, 简称 PFM)式:脉冲宽度为恒定值,通过调节开关频率来改变占空比,实现稳压目的。其核心是脉频调制器。

(3) 混合调制式:它是以上两种方式的组合,其开关周期和脉冲宽度都不固定,均可调节。它包含了脉宽调制器和脉频调制器。

以上 3 种工作方式统称为“时间比率控制”(Time Ratio Control, 简称 TRC)方式。其中,以脉宽调制器的应用最为广泛。需要指出的是,脉宽调制器既可作为一片独立的集成电路使用(例如 UC3842 型脉宽调制器),亦可被集成在 DC/DC 变换器中(例如 LM2576 型开关稳压器集成电路),还能集成在 AC/DC 变换器中(例如 TOP250 型单片开关电源集成电路)。其中,开关稳压器属于 DC/DC 电源变换器,开关电源一般为 AC/DC 电源变换器。

以脉宽调制式开关电源为例,其基本工作原理如图 1-1-1 所示。220V 交流电 u 首先经过整流滤波电路变成直流电压 U_1 ,再由功率开关管 VT 斩波、高频变压器 T 降压,得到高频矩形波电压,最后通过整流滤波后获得所需要的直流输出电压 U_0 。脉宽调制器能产生频率固定

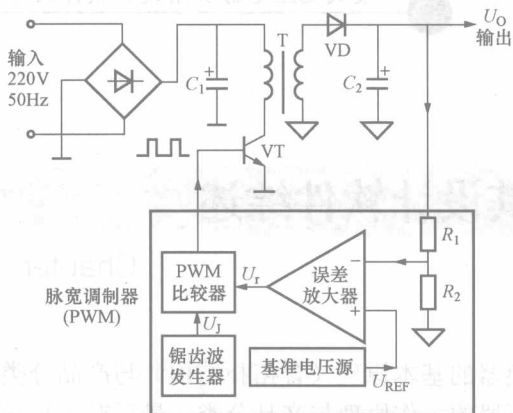


图 1-1-1 脉宽调制式开关电源的基本工作原理

而脉冲宽度可调的驱动信号，控制功率开关管的通、断状态，进而调节输出电压的高低，达到稳压目的。锯齿波发生器用于提供时钟信号。利用误差放大器和 PWM 比较器形成闭环调节系统。输出电压 U_O 经 R_1 、 R_2 取样后，送至误差放大器的反相输入端，与加在同相输入端的基准电压 U_{REF} 进行比较，得到误差电压 U_r ，再用 U_r 的幅度去控制 PWM 比较器输出的脉冲宽度，最后经过功率放大和降压式输出电路使 U_O 保持不变。 U_j 为锯齿波发生器的输出信号。

令直流输入电压为 U_1 ，开关式稳压器的效率为 η ，占空比为 D ，则功率开关管的脉冲幅度 $U_P = \eta U_1$ ，可得到公式

$$U_O = \eta D U_1 \quad (1-1-1)$$

这表明当 η 、 U_1 一定时，只要改变占空比，即可自动调节 U_O 值。自动稳压过程的波形如图 1-1-2 所示。图中， U_j 表示锯齿波发生器的输出电压， U_r 是误差电压， U_{PWM} 代表 PWM 比较器的输出电压。由图 1-1-2 可见，当 U_O 降低时， $U_r \uparrow \rightarrow D \uparrow \rightarrow U_O \uparrow$ ；反之，若 U_O 因某种原因而升高，则 $U_r \downarrow \rightarrow D \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$ 。这就是自动稳压的原理。

2. 开关电源的组成

开关电源由以下 4 部分构成：

(1) 主电路：从交流电网输入，到直流输出的主要电路。主要包括输入电磁干扰滤波器、输入整流滤波器、高频变压器、功率开关管和输出整流滤波器。

(2) 控制电路：包括输出端取样电路、反馈电路和脉宽调制器（或通/断控制电路）。

(3) 检测及保护电路：检测电路有过电流检测、过电压检测、欠电压检测、过热检测等；保护电路可分为过电流保护、过电压保护、欠电压保护、钳位保护、过热保护、自动重启动、软启动、缓启动等多种类型。

(4) 其他电路：如锯齿波发生器、偏置电路、光耦合器等。

二、单片开关电源的工作原理

所谓单片开关电源，是将开关电源的主要电路集成在一个芯片中，具有高集成度、高性价比、最简外围电路、最佳性能指标、能构成高效率无工频变压器的隔离式开关电源等特点。

单片开关电源有连续模式 CUM (Continuous Mode) 和不连续模式 DUM (Discontinuous Mode) 两种基本工作模式。这两种模式的开关电流波形如图 1-1-3 所示。由图 1-1-3 (a) 可见，在连续模式下，一次绕组开关电流是从一定幅度开始的，然后上升到峰值，再迅速回零，其开关电流波形呈梯形。这表明，在连续模式下，由于储存在高频变压器的能量在每个开关

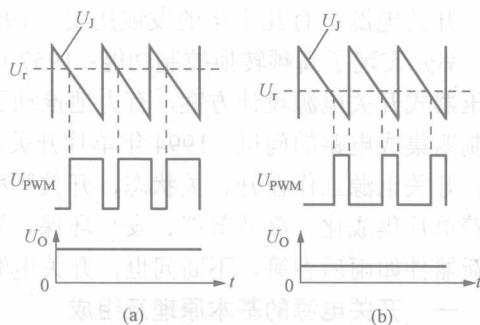


图 1-1-2 自动稳压过程的波形图

(a) 当误差电压升高时输出电压随之升高；

(b) 当误差电压降低时输出电压随之降低

周期内并未全部释放掉,因此下一个开关周期具有一个初始能量。采用连续模式可减小一次绕组峰值电流 I_P 和有效值电流 I_{RMS} ,降低芯片的功耗。但连续模式要求增大一次绕组电感量 L_P ,这会导致高频变压器的体积增大。综上所述,连续模式适用于功率较小的单片开关电源集成电路和尺寸较大的高频变压器。

如图 1-1-3 (b) 所示,不连续模式的开关电流是从零开始上升到峰值,再降至零的。这就意味着储存在高频变压器中的能量必须在每个开关周期内完全释放掉,其开关电流波形呈三角形。不连续模式下的 I_P 、 I_{RMS} 值较大,但所需要的 L_P 较小。因此,它适用于输出功率较大的单片开关电源集成电路,配尺寸较小的高频变压器。

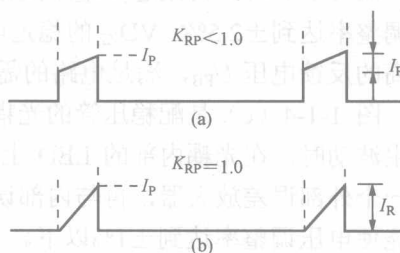


图 1-1-3 两种模式的开关电流波形

(a) 连续模式; (b) 不连续模式

三、单片开关电源反馈电路的基本类型

单片开关电源的电路可以千变万化,但其反馈电路只有 4 种基本类型: ①基本反馈电路; ②改进型基本反馈电路; ③配稳压管的光耦反馈电路; ④配 TL431 的光耦反馈电路。它们的简化电路如图 1-1-4 所示。

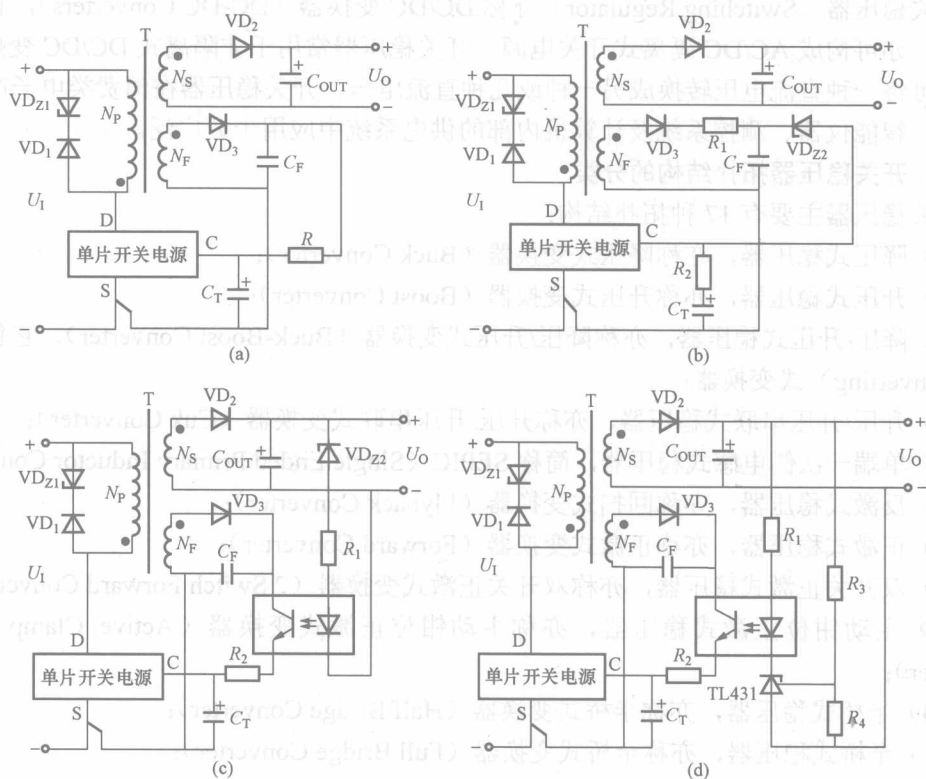


图 1-1-4 4 种基本反馈类型的简化电路

(a) 基本反馈电路; (b) 改进型基本反馈电路; (c) 配稳压管的光耦反馈电路; (d) 配 TL431 的光耦反馈电路

图 1-1-4 (a) 为基本反馈电路,其优点是电路简单,成本低廉,适于制作小型化、经济型开关电源;其缺点是稳压性能较差,电压调整率 $S_V = \pm 1.5\% \sim \pm 2.5\%$,负载调整率 $S_I \approx \pm 5\%$ 。

图 1-1-4 (b) 为改进型基本反馈电路, 只需增加一只稳压管 VD_{Z2} 和电阻 R_1 , 即可使负载调整率达到 $\pm 2.5\%$ 。 VD_{Z2} 的稳定电压一般为 22V, 必须相应增加反馈绕组的匝数, 以获得较高的反馈电压 U_{FB} , 满足电路的需要。

图 1-1-4 (c) 是配稳压管的光耦反馈电路。由 VD_{Z2} 提供参考电压 U_Z , 当输出电压 U_O 发生波动时, 在光耦内部的 LED 上可获得误差电压。因此, 该电路相当于给 TOPSwitch 增加一个外部误差放大器, 再与内部误差放大器配合使用, 即可对 U_O 进行调整。这种反馈电路能使电压调整率达到 $\pm 1\%$ 以下。

图 1-1-4 (d) 为配 TL431 的光耦反馈电路, 其电路较复杂, 但稳压性能最佳。这里用 TL431 型可调精密并联稳压器来代替普通的稳压管, 构成外部误差放大器, 进而对 U_O 作精细调整, 可使电压调整率和负载调整率均达到 $\pm 0.2\%$, 能与线性稳压电源相媲美。这种反馈电路适于构成精密开关电源。

在设计单片开关电源时, 应根据实际情况来选择合适的反馈电路, 才能达到规定的技术指标。

第二节 开关稳压器的拓扑结构与产品分类

开关稳压器 (Switching Regulator) 亦称 DC/DC 变换器 (DC-DC Converters), 它既可单独使用, 亦可构成 AC/DC 隔离式开关电源。开关稳压器常用于非隔离式 DC/DC 变换器中, 利用它可将一种直流电压转换成另一种或几种直流电压。开关稳压器在消费类电子产品、数字仪表、智能仪器、测控系统及计算机内部的供电系统中应用十分广泛。

一、开关稳压器拓扑结构的分类

开关稳压器主要有 17 种拓扑结构:

- (1) 降压式稳压器, 亦称降压式变换器 (Buck Converter);
- (2) 升压式稳压器, 亦称升压式变换器 (Boost Converter);
- (3) 降压/升压式稳压器, 亦称降压/升压式变换器 (Buck-Boost Converter), 它包含极性反转 (Inverting) 式变换器;
- (4) 升压/升压串联式稳压器, 亦称升压/升压串联式变换器 (Cuk Converter);
- (5) 单端一次侧电感式稳压器, 简称 SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter);
- (6) 反激式稳压器, 亦称回扫式变换器 (Flyback Converter);
- (7) 正激式稳压器, 亦称正激式变换器 (Forward Converter);
- (8) 双开关正激式稳压器, 亦称双开关正激式变换器 (2 Switch Forward Converter);
- (9) 主动钳位正激式稳压器, 亦称主动钳位正激式变换器 (Active Clamp Forward Converter);
- (10) 半桥式稳压器, 亦称半桥式变换器 (Half Bridge Converter);
- (11) 全桥式稳压器, 亦称全桥式变换器 (Full Bridge Converter);
- (12) 推挽式稳压器, 亦称推挽式变换器 (Push-pull Converter);
- (13) 相移开关式零电压稳压器, 亦称变换器, 简称 Phase Shift Switching ZVT (Phase Shift Switching Zero Voltage Transition);
- (14) 零电流开关稳压器, 简称 ZVS (Zero Current Switching Converter);
- (15) 软开关稳压器, 亦称软开关变换器 (Soft Switching Converter);

(16) 复合式稳压器, 由 DC/DC (或 AC/DC) 变换器和低压差线性稳压器 (LDO) 构成;

(17) 可编程稳压器, 可由数字电位器与开关稳压器构成。

二、开关稳压器常用拓扑结构的工作原理

下面介绍开关稳压器最常用的 5 种拓扑结构的工作原理。

1. 降压式 DC/DC 变换器的基本原理

降压式变换器亦称 Buck 变换器, 是最常用的一种 DC/DC 变换器。降压式 DC/DC 变换器的基本原理如图 1-2-1 所示。变换器可用开关 S 来等效。当 S 闭合时除向负载供电之外, 还有一部分电能储存于 L 、 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 中的电能传送给负载, 维持输出电压不变, 并且 $U_O < U_I$ 。

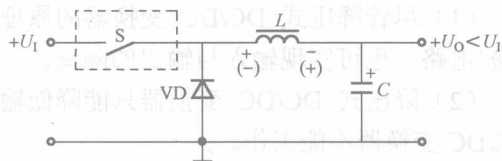


图 1-2-1 降压式 DC/DC 变换器的基本原理

降压式 DC/DC 变换器具有以下特点:

- (1) U_I 先通过开关器件 S, 再经过储能电感 L 。
- (2) $U_I = U_L + U_O$, 因 $U_O < U_I$, 故称之为降压式, 它具有降低电压的作用。
- (3) 输出电压与输入电压的极性相同。

降压式 DC/DC 变换器的典型产品有 LM2576、MAX639、L4960、L4970A 等。其中, LM2576 的外围电路最简单。

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, 在分布式电源系统中经常会用到。例如它可将 +24V 或 +48V 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。降压式变压器可用一只 NPN 型功率开关管 (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 DC/DC 变换器的简化电路如图 1-2-2 (a) 所示, 图 1-2-2 (b)、(c) 则示出了当开关闭合、断开时的电流路径。

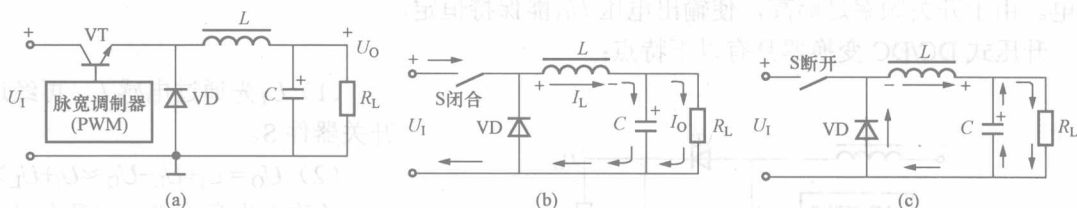


图 1-2-2 降压式 DC/DC 变换器的简化电路及电流路径

(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_I 与储能电感 L 接通, 因此输入—输出压差 ($U_I - U_O$) 就加在 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 1-2-2 (b) 所示。当开关断开时, L 与 U_I 断开, 但由于电感电流不能在瞬间发生突变, 因此在 L 上就产生反向电动势以维持通过电感的电流不变。此时续流二极管 VD 导通, 储存在 L 中的电能就经过由 VD 构成的回路向负载供电, 维持输出电压不变, 如图 1-2-2 (c) 所示。开关断开时, C 对负载放电, 这有利于维持 U_O 和 I_O 不变。

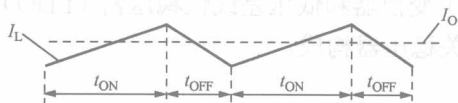


图 1-2-3 降压式 DC/DC 变换器储能电感的电流波形

的等效负载电流 I_O 为 I_L 与 I_C 的平均值。电感电流波形中峰与峰之间的差值就是电感纹波电流，为保证纹波电流小于额定直流电流的 20%~30%， L 应选得足够大。

需要说明几点：

(1) 尽管降压式 DC/DC 变换器的原理图中只有一个电感，但通过输入级变压器及整流滤波电路，也可实现输入与输出的隔离。

(2) 降压式 DC/DC 变换器只能降低输入电压，若输入电压低于所要求的输出电压，则 DC/DC 变换器不能工作。

(3) 降压式 DC/DC 变换器只有一个输出。如果需要再从 +5V 电压变为 +3.3V 电压，可接第二级线性 DC/DC 变换器，构成复合式稳压电源。多路输出 DC/DC 变换器经常采用这种设计方法。

(4) 降压式 DC/DC 变换器既可工作在连续模式，亦可工作在不连续模式，但其输入电流总是不连续的。当功率开关管关断时，输入电流会降到零，这就要求接在输入端的电磁干扰 (EMI) 滤波器具有良好的特性。

2. 升压式 DC/DC 变换器的基本原理

升压式 DC/DC 变换器简称 Boost 变换器，其基本原理如图 1-2-4 所示。 U_I 为直流输入电压， U_O 为直流输出电压，开关 S 代表变换器。当 S 闭合时，电感 L 上有电流通过而储存电能，电压极性是左端为正、右端为负，使整流二极管 VD 截止，此时 C 对负载放电。当 S 断开时， L 上产生的反向电动势极性是左端为负、右端为正，使得 VD 导通， L 上储存的电荷经过由 L 、 R_L 和 VD 构成的回路给负载供电，同时对 C 进行充电。由于开关频率足够高，使输出电压 U_O 能保持恒定。

升压式 DC/DC 变换器具有以下特点：

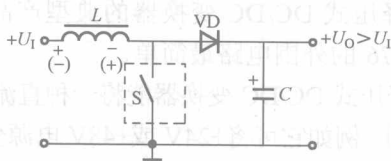


图 1-2-4 升压式 DC/DC 变换器的基本原理

(1) U_I 先通过电感 L ，再经过开关器件 S 。

(2) $U_O = U_I + U_L - U_D \approx U_I + U_L > U_I$ ，故称之为升压式，它具有提升电压的作用，使 $U_O > U_I$ 。 U_L 为电感 L 上压降。 U_D 为续流二极管 VD 的压降，通常可忽略不计。

(3) 输出电压与输入电压的极性相同。

升压式 DC/DC 变换器的典型产品有 MAX770、MAX1771 等。

升压式 DC/DC 变换器的简化电路如图 1-2-5 (a) 所示，图 1-2-5 (b)、

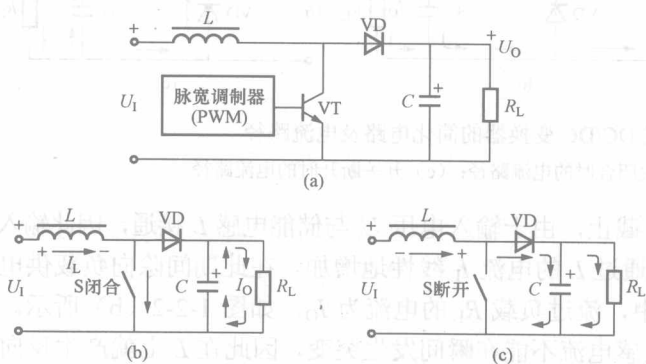


图 1-2-5 升压式 DC/DC 变换器的简化电路及电流路径

(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

(c) 中还标出了在开关闭合、断开时的电流路径。如图 1-2-5 (b) 所示, 当开关闭合时, 整流二极管 VD 截止, 输入电压经过电感 L 后直接返回, 这导致通过电感电流 I_L 线性地增大。此时输出滤波电容 C 向负载放电, 负载 R_L 上的电流为 I_O 。

如图 1-2-5 (c) 所示, 当开关断开时, 由于电感电流不能在瞬间发生突变, 因此在 L 上就产生反向电动势 U_L 以维持 I_L 不变。此时整流二极管 VD 导通, U_L 就与 U_I 串联后, 以超过 U_I 的电压向负载提供电流, 并对输出滤波电容 C 进行充电。

升压式 DC/DC 变换器的最大可用总功率等于输入电压乘以最大平均输入电流。由于升压式 DC/DC 变换器的输出电压比输入电压高, 因此输出电流必须低于输入电流。

3. 降压/升压式 DC/DC 变换器的基本原理

降压/升压式 DC/DC 变换器亦称 Buck/Boost 电源变换器。其特点是当输入电压高于输出电压时, DC/DC 变换器工作在降压 (Buck) 模式, 即 $U_O < U_I$; 当输入电压低于输出电压时, DC/DC 变换器工作在升压 (Boost) 模式, 即 $U_O > U_I$ 。在两种工作模式下均可输出连续电流。

利用降压/升压式 DC/DC 变换器, 还可构成极性反转式 DC/DC 变换器, 简称反转式 DC/DC 变换器 (Inverting Regulator)。其特点是输出电压的极性与输入电压相反, 且输出的负电压既可高于输入电压, 也可低于或等于输入电压。极性反转式 DC/DC 变换器的简化电路如图 1-2-6 (a) 所示。当开关闭合时, 输入电压通过电感 L 直接返回, 在 L 上储存电能, 此时输出电容 C 放电, 为负载提供电流 I_O , 见图 1-2-6 (b)。当开关断开时, 在 L 上产生反向电动势, 使二极管 VD 从截止变为导通, 电感电流给负载供电并对输出电容进行充电, 维持输出电压不变, 见图 1-2-6 (c)。注意, 极性反转式 DC/DC 变换器中输出电容 C 的极性与图 1-2-5 恰好相反。

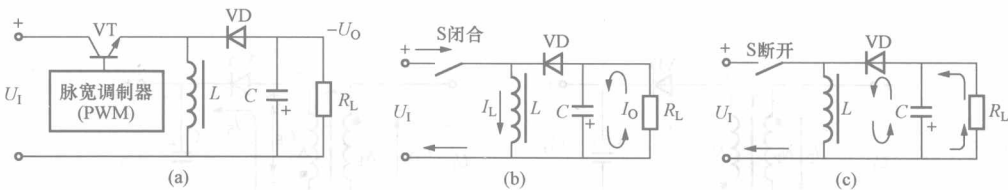


图 1-2-6 极性反转式 DC/DC 变换器的简化电路及电流路径
(a) 简化电路; (b) 开关闭合时的电流路径; (c) 开关断开时的电流路径

降压/升压式 DC/DC 变换器只能有一个输出, 且输出与输入不隔离。其中的升压式输出电压不能低于输入电压, 即使关断功率开关管, 输出电压也仅等于输入电压 (忽略整流二极管压降)。

另一种极性反转式 DC/DC 变换器的电路原理如图 1-2-7 所示。以模拟开关 S_1 和 S_2 为一组, S_3 和 S_4 为另一组, 两组开关交替通、断。正半周时 S_1 与 S_2 闭合, S_3 和 S_4 断开, C_1 被充电到 U_{DD} 。负半周时 S_3 和 S_4 闭合, S_1 与 S_2 断开, C_1 的正端接地, 负端接 U_O 。由于 C_1 与 C_2 并联, 使 C_1 上的一部分电荷就转移到 C_2 , 并在 C_2 上形成负压输出。在模拟开关的作用下, C_1 被不断地充电, 使其两端压降维持在 U_{DD} 值。显然, C_1 就相当于一个“充电泵”, 故称之为泵电容, 由 C_1 、 C_2 等构成泵电源。该电路属于高效 DC/DC 电源变换器, 电能损耗极低。这种电源变换器的

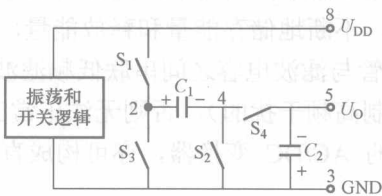


图 1-2-7 极性反转式 DC/DC 变换器的电路原理二

典型产品有美国 Intersil 公司生产的 ICL7660、ICL7662, 它们采用 CMOS 工艺制成的高效率、小功率直流电源变换器, 可将单电源变换成对称输出的双电源, 并能实现倍压或多倍压输出。具有电源效率高 (空载为 99.7%, 带负载后为 95%)、外围电路简单 (仅需两只电容) 等优点。可广泛用于数字电压表、数据采集系统等领域。

4. 反激式 DC/DC 变换器的基本原理

反激式 DC/DC 变换器是开关稳压器及开关电源最基本的一种拓扑结构, 其应用领域非常广泛。许多设计软件将反激式设置为默认的拓扑类型。

反激式 DC/DC 变换器亦称回扫式变换器 (Flyback Converter)。凡是在功率开关管截止期间向负载输出能量的统称为反激式变换器, 它是从降压/升压式变换器 (Buck-Boost Converter) 演变而来的。

反激式 DC/DC 变换器的基本原理如图 1-2-8 所示。 U_I 为直流输入电压, U_O 为直流输出电压, T 为高频变压器, N_P 为一次绕组, N_S 为二次绕组。V 为功率开关管 MOSFET, 其栅极接脉宽调制信号, 漏极 (驱动端) 接一次绕组的下端。VD 为输出整流二极管, C 为输出滤波电容。在脉宽调制信号的正半周时 V 导通, 一次侧有电流 I_P 通过, 将能量储存在一次绕组中。此时二次绕组的输出电压极性是上端为负、下端为正, 使 VD 截止, 没有输出, 如图 1-2-8 (a) 所示。负半周时 V 截止, 一次侧没有电流通过, 根据电磁感应的原理, 此时在一次绕组上会产生感应电压 U_{OR} , 使二次绕组产生电压 U_S , 其极性是上端为正、下端为负, 因此 VD 导通, 经过 VD、C 整流滤波后获得输出电压, 如图 1-2-8 (b) 所示。由于开关频率很高, 使输出电压 (亦即滤波电容两端的电压) 基本维持恒定, 从而实现了稳压目的。

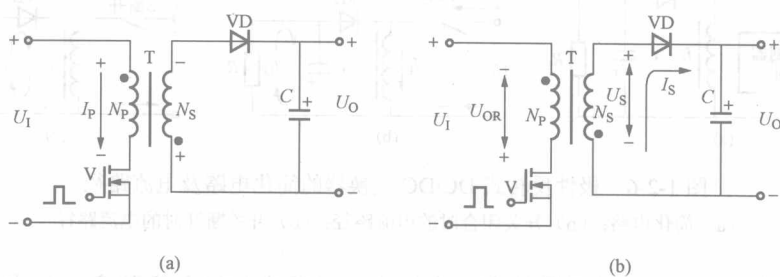


图 1-2-8 反激式 DC/DC 变换器的基本原理

(a) 功率开关管导通时储存能量; (b) 功率开关管关断时传输能量

反激式 DC/DC 变换器主要有以下特点:

- (1) 高频变压器一次绕组的同名端与二次绕组的同名端极性相反, 并且一次绕组的同名端接 U_I 的正端, 另一端接功率开关管的驱动端。
- (2) 当功率开关管导通时, 将能量储存在高频变压器中; 当功率开关管截止时再将能量传输给二次侧。高频变压器就相当于一个储能电感, 不断地储存能量和释放能量。
- (3) 反激式 DC/DC 变换器不能在输出整流二极管与滤波电容之间串联低频滤波电感 (小磁珠电感除外, 其电感量仅为几个微亨, 是专门抑制高频干扰的), 否则无法正常工作。
- (4) 反激式 DC/DC 变换器既可构成交流输入的 AC/DC 变换器, 亦可构成直流输入的 DC/DC 变换器。
- (5) 允许设计成单路或多路输出式 DC/DC 变换器, 并且输出电压的极性可以与输入电

压的极性相反。

(6) 反激式 DC/DC 变换器可工作在连续模式(二次绕组电流总大于零)或非连续模式(在每个开关周期结束时二次绕组的电流降至零)。

反激式 DC/DC 变换器的简化电路如图 1-2-9 (a) 所示。图中, I_P 为一次侧电流, I_S 为二次侧电流。正半周时 C 对负载放电, 负载电流为 I_O ; 负半周时, I_S 对 C 进行充电, 并给负载供电, 维持输出电压不变。

反激式 DC/DC 变换器有非隔离式和隔离式两种类型。非隔

离反激式 DC/DC 变换器的简化电路如图 1-2-10 (a) 所示。从功率开关管 MOSFET 的栅极上加入 PWM 调制信号。当功率开关管导通时, 输入电压加在电感 L 上, 使电流沿斜坡上升, 并在电感中存储能量。当功率开关管关断时, 电感电流经过整流二极管 VD 向输出电容 C 和负载 R_L 供电。

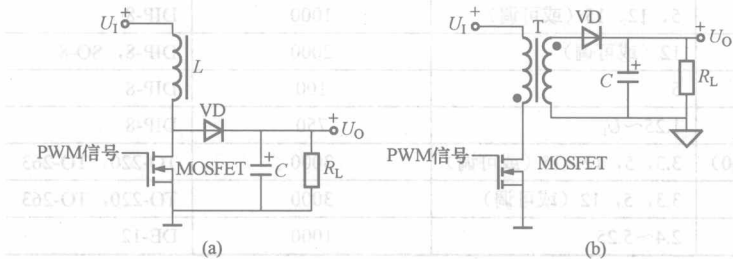


图 1-2-10 反激式 DC/DC 变换器的简化电路
(a) 非隔离式的简化电路; (b) 隔离式的简化电路

出与一次绕组互相隔离。只需调节一次绕组与二次绕组的匝数比, 即可改变各路输出电压。

5. 正激式 DC/DC 变换器的基本原理

正激式变换器 (Forward Converter) 可从降压式变换器 (Buck Converter) 演变而来, 二者的区别是正激式变换器增加了高频变压器, 以实现二次侧与一次侧的隔离。正激式 DC/DC 变换器的拓扑结构如图 1-2-11 所示。图中 VD_1 为整流二极管, VD_2 为续流二极管, L 为具有储能作用的滤波电感。其工作原理是当功率开关管导通时, VD_1 导通, 除向负载供电之外, 还有一部分电能储存在 L 和 C 中, 此时 VD_2 截止。当功率开关管关断时, VD_1 截止, VD_2 导通, 储存在 L 中的电能就经过由 VD_2 构成的回路向负载供电, 维持输出电压不变。

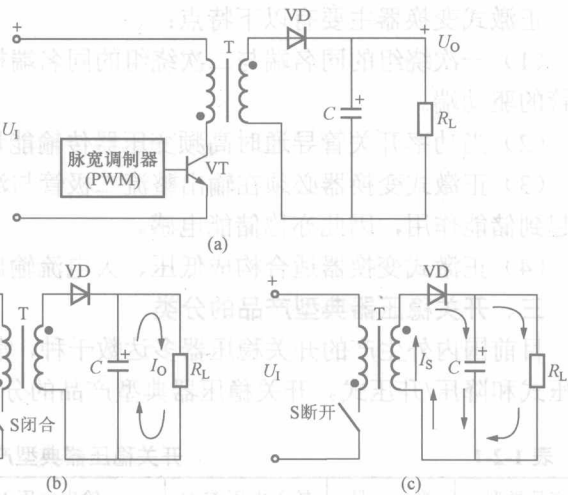


图 1-2-9 反激式 DC/DC 变换器的简化电路及电流路径
(a) 简化电路; (b) 开关闭合时的电流路径; (c) 开关断开时的电流路径

隔离反激式 DC/DC 变换器的简化电路如图 1-2-10 (b) 所示, 其工作原理与图 1-2-10 (a) 相似。区别只是利用高频变压器起到隔离作用, 并且用一次侧绕组来代替储能电感 L 。

如果高频变压器有多个二次绕组, 即可设计成多路输出反激式 DC/DC 变换器, 所有输

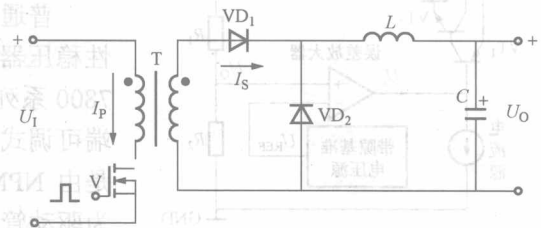


图 1-2-11 正激式 DC/DC 变换器的拓扑结构