

DANPIAN KAIGUAN DIANYUAN  
QUDONG LED DIANLUSHEJI YU SHILI

# 单片开关电源 驱动LED

## 电路设计与实例

周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 单片开关电源 驱动LED 电路设计与实例

周志敏 纪爱华 等 编著

机械工业出版社

ISBN 978-7-111-25501-1

内容简介：本书详细介绍了单片开关电源驱动LED电路的设计方法与实例。

本书可作为从事开关电源设计、LED照明设计及相关工作的工程技术人员、大专院校师生及爱好者的参考书。

本书可作为高等院校相关专业教材。

责任编辑：李海霞

封面设计：李海霞

印刷：北京印刷厂

2009年11月第1版第1次印刷

举报电话



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

北京市  
海淀区

北京市  
海淀区

## 内 容 提 要

本书结合国内外 LED 驱动技术的应用和发展,系统地阐述了基于单片开关电源驱动 LED 的最新设计及应用电路实例。全书共 5 章,主要内容有:单片开关电源基础知识、LED 驱动器前端电路、LED 驱动电路、LED 驱动器调光及保护电路、单片开关电源驱动 LED 电路设计实例等。本书题材新颖实用、内容丰富、深入浅出、文字通俗,具有很高的实用价值。

本书可供从事基于单片开关电源驱动 LED 电路的开发、设计和应用的工程技术人员和高等院校的师生阅读参考,也可作为 LED 驱动电路设计培训的基础教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

单片开关电源驱动 LED 电路设计与实例/周志敏等编著. —北京:中国电力出版社,2013.9

ISBN 978-7-5123-4735-9

I. ①单… II. ①周… III. ①单片电路-开关电源-电路设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 169380 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 338 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
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

LED是一种可将电能转变为光能的半导体发光器件,属于固态光源。LED优点众多,如寿命长、耗能低,而且控制极为方便,属于典型的绿色照明光源。随着LED技术的不断创新和发展,使得LED在照明领域得以推广应用。LED作为一种新型的照明光源技术,其应用前景举世瞩目,被誉为21世纪照明最有价值的光源,必将引起照明领域一场新的革命。自从LED出现,无论是发光原理还是功能等方面都具有其他传统光源无法比拟的优势,因此,LED照明已成为21世纪照明领域的一种趋势。

LED照明技术的发展引起了国内外光源界的普遍关注,现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产业。LED产品的开发研制生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。目前,随着LED照明技术的广泛应用及潜在的市场,LED照明显示了强大的发展潜力,并形成完整的LED照明产业链。

在21世纪,照明设计将会是以LED光源为主流,而LED驱动电路的研发、设计是LED应用技术创新的关键技术,直接关系到LED产品的性能和使用寿命。为此本书结合LED驱动电路的最新设计与应用技术,把LED驱动电路设计要点与电路实例有机地结合起来,系统地讲述了从事LED驱动电路研发、设计所必备的基础知识,及在LED驱动电路设计过程中应掌握的设计要点,读者可将书中的单片开关电源驱动LED电路设计实例直接或作部分修改后,应用于工程设计中。本书在写作中尽量做到有针对性和实用性,在保证科学性的同时,注重通俗性。力求做到通俗易懂和结合实际工程应用,以便于读者掌握LED驱动电路的设计要点,以使从事LED驱动电路开发、设计、应用的技术人员从中获益。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平,本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内外的专业学者和同行及美国电源集成公司(Power Integrations)的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,水平有限,难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者





# 目 录

前言

<b>第1章 单片开关电源基础知识</b> .....	1
1.1 单片电感式开关电源 .....	1
1.1.1 开关电源构成与分类 .....	1
1.1.2 开关型DC/DC变换器主电路结构 .....	4
1.1.3 开关型DC/DC变换器控制方式 .....	11
1.2 电荷泵工作原理与结构 .....	19
1.2.1 电荷泵工作原理 .....	19
1.2.2 电荷泵结构 .....	24
1.2.3 电荷泵电路分析 .....	28
1.2.4 电荷泵技术创新 .....	34
<b>第2章 LED驱动器前端电路</b> .....	40
2.1 AC/DC电路设计要点与电路实例 .....	40
2.1.1 AC/DC电路设计要点 .....	40
2.1.2 AC/DC电路设计实例 .....	46
实例1 基于PT4107的LED驱动器 .....	46
实例2 非隔离降压式LED驱动电路 .....	50
2.2 功率因数校正电路设计要点与电路实例 .....	51
2.2.1 功率因数校正电路设计要点 .....	51
2.2.2 具有功率因数校正的LED驱动电路设计实例 .....	68
实例1 无源PFC LED驱动电路 .....	68
实例2 带PFC的20W LED驱动电路 .....	71
实例3 可调光的LED驱动电路 .....	74
实例4 单级PFC恒压/恒流LED驱动电路 .....	76
实例5 基于NCP1014的LED驱动电路 .....	77
<b>第3章 LED驱动电路</b> .....	80
3.1 LED串联电路设计要点与电路实例 .....	80

3.1.1	LED 串联电路设计要点	80
3.1.2	驱动串联 LED 电路设计实例	83
实例 1	基于 XC9103 驱动白光 LED 电路	83
实例 2	CAT37 驱动白光 LED 电路	84
3.2	LED 并联电路设计要点与电路实例	88
3.2.1	LED 并联电路设计要点	88
3.2.2	驱动并联 LED 电路设计实例	89
实例 1	基于 MAX684 电荷泵驱动的白光 LED 电路	89
实例 2	基于 AP3605 的 LED 背光照明驱动电路	90
3.3	LED 混联电路设计要点与电路实例	92
3.3.1	LED 混联电路设计要点	92
3.3.2	驱动混联 LED 电路实例	95
实例 1	基于 LM3431 的 LED 背光照明驱动电路	95
实例 2	基于 LT3595 的 LED 背光照明驱动电路	97
3.4	白光 LED 并联与串联驱动电路特性	100
3.4.1	白光 LED 并联与串联驱动	100
3.4.2	LED 串联与并联驱动电路特性分析与比较	107
<b>第4章</b>	<b>LED 驱动器调光及保护电路</b>	<b>115</b>
4.1	LED 驱动器调光电路	115
4.1.1	LED 的调光方式	115
4.1.2	调光控制器	119
4.2	LED 驱动器保护电路	128
4.2.1	浪涌抑制电路设计要点	128
4.2.2	LED 驱动器热管理	138
4.3	LED 驱动器温度补偿及保护电路	147
4.3.1	LED 驱动器温度补偿	147
4.3.2	LED 驱动器及 LED 保护电路	155
<b>第5章</b>	<b>单片开关电源驱动 LED 电路设计实例</b>	<b>160</b>
实例 1	基于 LNK302PN 的 0.5W 非隔离恒流 LED 驱动电路	160
实例 2	基于 LNK306PN 的高效 LED 驱动电路	161
实例 3	基于 LNK306PN 的填谷式电流修整可调光 LED 驱动电路	162
实例 4	基于 LNK306PN 的高效恒流降压式 LED 驱动电路	163
实例 5	基于 TNY270GN 的 14W 高效 LED 驱动电路	164
实例 6	基于 TOP246F 的隔离式、带功率因数校正的 17W LED 驱动电路	166
实例 7	基于 LNK304PN 的 1.25W 非隔离恒流 LED 驱动电路	167
实例 8	基于 LNK605DG 的高效能、低成本、非隔离 350mA/12V LED 驱动电路	168
实例 9	基于 LNK606PG 的高效率 7.6V/700mA 隔离式 LED 驱动电路	170
实例 10	基于 LNK605DG 的隔离式 350mA/4.2W LED 驱动电路	172

实例 11	基于 LNK605DG 的非隔离式 LED 驱动电路 .....	173
实例 12	基于 LNK605DG 的 3.6W LED 驱动电路 .....	175
实例 13	基于 LNK458KG 的非隔离式 4.5W LED 驱动电路 .....	176
实例 14	基于 LNK457D 的非隔离式可调光 LED 驱动电路 .....	177
实例 15	基于 LNK406EG 的高功率因数、可控硅调光的 14W LED 驱动电路 .....	179
实例 16	基于 LNK406EG 的 15W LED 驱动电路 .....	182
实例 17	基于 LNK406EG 的 15W LED 驱动电路 .....	184
实例 18	基于 LNK406EG 的 15W 无电解电容 LED 驱动电路 .....	186
实例 19	基于 LNK417EG 的带有波纹滤波器的 15W LED 驱动电路 .....	187
实例 20	基于 LNK409EG 的 25W 降压—升压 LED 驱动电路 (一) .....	188
实例 21	基于 LNK409EG 的 25W 降压—升压 LED 驱动电路 (二) .....	190
参考文献	.....	191

## 单片开关电源基础知识

### 1.1 单片电感式开关电源

#### 1.1.1 开关电源构成与分类

开关电源具有体积小、效率高等优点，在各类电子产品中得到广泛的应用。但由于开关电源的控制电路比较复杂，输出纹波电压较高，因此其应用也受到一定的限制。

电子装置小型轻量化的关键是供电电源的小型化，因此需要尽可能地降低电源电路中的损耗和减少电源的体积。开关电源中的调整管工作于开关状态，必然存在开关损耗，而且损耗的大小随开关频率的提高而增加。另外，开关电源中的变压器、电抗器等磁性元件及电容元件的损耗，也随开关频率的提高而增加。

目前市场上开关电源中功率管多采用双极型晶体管，开关频率可达几万赫兹，而采用 MOS-FET 器件的开关电源的开关频率可达几十万赫兹，为提高开关电源的开关频率，必须采用高速开关器件。对于开关频率在兆赫以上的开关电源可采用谐振工作方式，其开关损耗理论上为零，噪声也很小，采用谐振工作方式的兆赫级开关电源目前已经实用化。

#### 1. 开关电源的基本构成

开关电源采用功率半导体器件作为开关器件，通过周期性间断工作，控制开关器件的占空比来调整输出电压。开关电源的基本构成如图 1-1 所示，图中 DC/DC 变换器是开关电源的核心部分（进行功率转换），此外还有启动、过电流与过电压保护、噪声滤波等电路。输出采样电路（ $R_1$ 、 $R_2$ ）检测输出电压变化，并将检测到的输出电压变化量与基准电压  $U_r$  进行比较，比较后获得的误差电压经过放大及脉宽调制（PWM）电路处理，输出至驱动电路控制功率器件的占空比，从而达到调整输出电压大小的目的。图 1-2 所示是一种开关电源的原理电路。

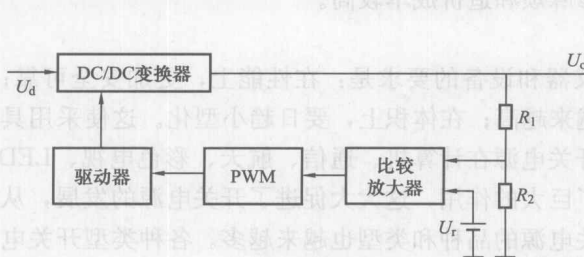


图 1-1 开关电源的基本构成

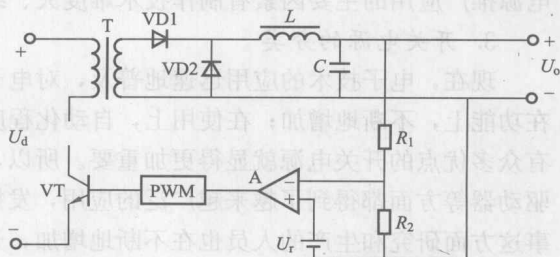


图 1-2 开关电源的原理电路



开关电源核心部分的DC/DC变换器有多种电路形式,常用的有工作波形为方波的PWM变换器和工作波形为准正弦波的谐振型变换器。

## 2. 开关电源的优缺点

### (1) 开关电源的优点。

1) 功耗小,效率高。在图1-2所示的开关电源电路中,开关管在驱动信号的驱动下,交替工作在导通—截止和截止—导通的开关状态,开关管的转换速度很快,频率一般为50kHz左右,在一些技术先进的国家,可以做到几百或者近1000kHz。这使得开关管的功耗很小,电源的效率可以大幅度地提高,可达到80%以上。

2) 体积小,重量轻。在开关电源电路中没有采用笨重的工频变压器,并因开关管上的耗散功率大幅度降低后,又省去了较大的散热片。由于这两方面原因,使开关电源实现了体积小,重量轻。

3) 稳压范围宽。开关电源的输出电压是由激励信号来调节的,输入信号电压的变化可以通过调频或调宽来进行补偿,这样,在工频电网电压变化较大时,它仍能够保证有较稳定的输出电压。所以开关电源的稳压范围很宽,稳压效果很好。此外,改变开关管占空比的方法有脉宽调制型和频率调制型两种。这样,开关电源不仅具有稳压范围宽的优点,而且实现稳压的方法也较多,在设计中可以根据实际应用的要求,灵活地选用各种类型的开关电源。

4) 滤波的效率大为提高。由于开关电源开关频率的提高,使滤波电容的容量和体积大为减少。开关电源的工作频率通常工作在50kHz以上,是线性稳压电源的1000倍,这使整流后的滤波效率几乎也提高了1000倍。即使采用半波整流后加电容滤波,效率也提高了500倍。在相同的纹波输出电压下,采用开关电源时,滤波电容的容量只是线性稳压电源中滤波电容的1/1000~1/500。

5) 电路形式灵活多样。开关电源的形式有自激式和他激式,有调宽型和调频型,有单端式和双端式等,设计中可以发挥各种类型电路的特长,设计出能满足不同应用场合的开关电源。

(2) 开关电源的缺点。开关电源的缺点是存在较为严重的开关干扰,在开关电源中,功率调整管工作在开关状态,在其开关过程中产生的交流电压和电流通过电路中的其他元器件产生尖峰干扰和谐振干扰,这些干扰如果不采取一定的措施进行抑制、消除和屏蔽,就会严重地影响系统的正常工作。此外,因开关电源振荡电路中没有工频变压器隔离,这些干扰就会串入工频电网,使附近的其他电子仪器、设备和控制设备受到严重的干扰。

目前,由于我国微电子技术、阻容器件生产技术以及磁性材料技术与一些技术先进国家还有一定的差距,因而开关电源的造价还不能进一步降低,也影响到其广泛应用和可靠性的进一步提高。所以在我国的电子仪器以及机电一体化仪器中,开关电源还不能得到十分广泛的应用。特别是开关电源中的高压电解电容器、高反压大功率开关管、开关变压器的磁芯材料等器件,我国还处于研究、开发阶段。在一些技术先进国家,开关电源虽然有了一定的发展,但在实际应用中也还存在一些问题,不能十分令人满意。开关电源的另一个缺点是电路结构复杂,故障率高,维修麻烦。对此,如果在设计和制造中不予以充分重视,则将直接影响到开关电源的推广应用。当今,影响开关电源推广应用的主要因素有制作技术难度大、维修麻烦和造价成本较高。

## 3. 开关电源的分类

现在,电子技术的应用迅速地普及,对电子仪器和设备的要求是:在性能上,更加安全可靠;在功能上,不断地增加;在使用上,自动化程度越来越高;在体积上,要日趋小型化。这使采用具有众多优点的开关电源就显得更加重要。所以,开关电源在计算机、通信、航天、彩色电视、LED驱动器等方面都得到了越来越广泛的应用,发挥了巨大的作用,这大大促进了开关电源的发展,从事这方面研究和生产的人员也在不断地增加,开关电源的品种和类型也越来越多。各种类型开关电源的原理图如图1-3所示。目前开关电源可分为以下几类:

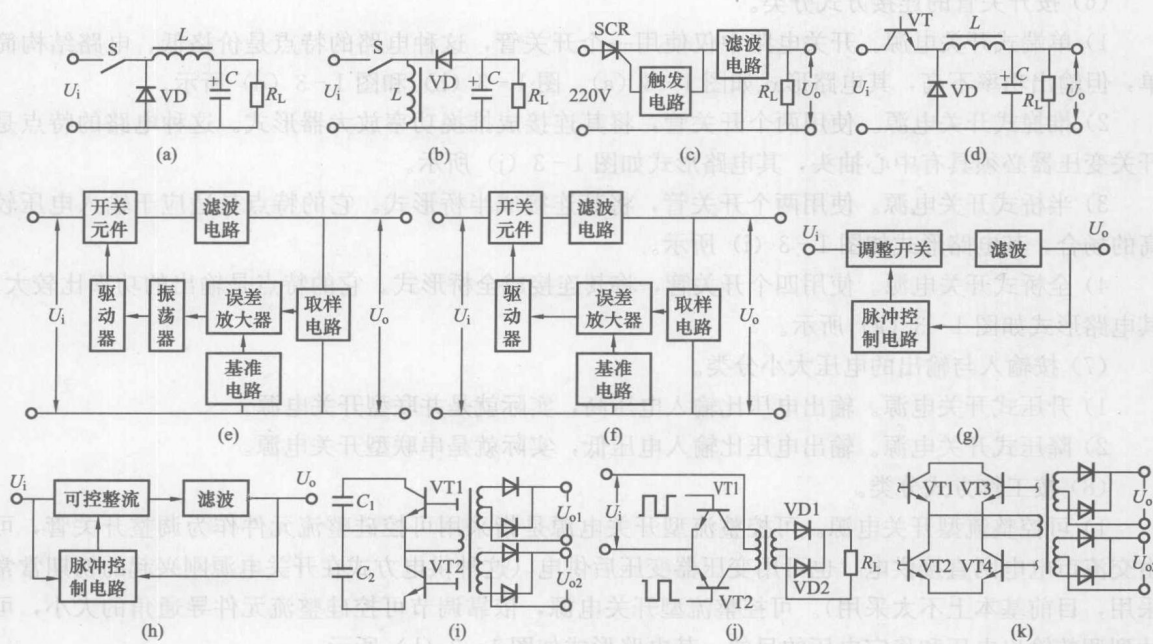


图 1-3 各种类型开关电源的原理图

(a) 串联型; (b) 并联型; (c) 晶闸管型; (d) 晶体管型; (e) 他励式; (f) 自励式;

(g) 斩波型; (h) 可控整流型; (i) 半桥式; (j) 推挽式; (k) 全桥式

(1) 按激励方式分类。

1) 他励式开关电源。电路中设有激励信号的振荡器，电路形式如图 1-3 (e) 所示。

2) 自励式开关电源。开关管兼作振荡器中的振荡管，电路形式如图 1-3 (f) 所示。

(2) 按调制方式分类。

1) 脉宽调制型开关电源。开关电路的振荡频率保持不变，通过改变脉冲宽度来改变和调节输出电压的大小，有时通过取样电路、耦合电路等构成反馈闭环回路，来稳定输出电压的幅度。

2) 频率调制型开关电源。开关电路的占空比保持不变，通过改变振荡器的振荡频率来调节和稳定输出电压的幅度。

3) 混合调制型开关电源。通过调节开关管导通时间和开关频率来完成调节和稳定输出电压的目的。

(3) 按开关管电流的工作方式分类。

1) 开关型开关电源。用开关管把直流变成高频标准方波，电路形式类似于他励式。

2) 谐振型开关电源。开关管与 LC 谐振回路配合将直流变成标准正弦波，电路形式类似于自励式。

(4) 按开关管的类型分类。

1) 晶体管型开关电源。采用晶体管作为开关管，电路形式如图 1-3 (d) 所示。

2) 晶闸管型开关电源。采用晶闸管作为开关管，这种电路的特点是直接输入交流电，不需要一次整流部分，其电路形式如图 1-3 (c) 所示。

(5) 按储能电感与负载的连接方式分类。

1) 串联型开关电源。储能电感串联在输入与输出电压之间，电路形式如图 1-3 (a) 所示。

2) 并联型开关电源。储能电感并联在输入与输出电压之间，电路形式如图 1-3 (b) 所示。

(6) 按开关管的连接方式分类。

1) 单端式开关电源。开关电路中仅使用一个开关管，这种电路的特点是价格低、电路结构简单，但输出功率不高，其电路形式如图 1-3 (a)、图 1-3 (b) 和图 1-3 (d) 所示。

2) 推挽式开关电源。使用两个开关管，将其连接成推挽功率放大器形式。这种电路的特点是开关变压器必须具有中心抽头，其电路形式如图 1-3 (j) 所示。

3) 半桥式开关电源。使用两个开关管，将其连接成半桥形式。它的特点是适应于输入电压较高的场合，其电路形式如图 1-3 (i) 所示。

4) 全桥式开关电源。使用四个开关管，将其连接成全桥形式。它的特点是输出的功率比较大，其电路形式如图 1-3 (k) 所示。

(7) 按输入与输出的电压大小分类。

1) 升压式开关电源。输出电压比输入电压高，实际就是并联型开关电源。

2) 降压式开关电源。输出电压比输入电压低，实际就是串联型开关电源。

(8) 按工作方式分类。

1) 可控整流型开关电源。可控整流型开关电源是指采用可控硅整流元件作为调整开关管，可由交流市电电网直接供电，也可用变压器变压后供电（这种供电方式在开关电源刚兴起的初期常常采用，目前基本上不太采用）。可控整流型开关电源，依靠调节可控硅整流元件导通角的大小，可达到调整输出电压和稳定电压的目的。其电路形式如图 1-3 (h) 所示。

2) 斩波型开关电源。斩波型开关电源是指采用直流供电，输入直流电压加到开关电路上，在开关电路的输出端得到单向的脉动直流，经过滤波得到与输入电压不同的稳定直流电压。斩波型开关电源的控制电路从输出电压取样，经过比较、放大、控制脉冲发生电路产生的脉冲信号，用以控制开关管的导通时间和截止时间的长短或开关管的工作频率，最后达到稳定输出电压的目的。电路的过电压保护电路也是依据这一部分提供的取样信号来进行工作的，斩波型电路形式如图 1-3 (g) 所示。

3) 隔离型开关电源。这种形式的开关电源是在输入回路与逆变电路之间，利用高频变压器（也可称为开关变压器）磁场的变化实现能量的传递，没有电流间的直接流通。隔离型开关电源采用直流供电，经过开关电路，将直流电变成频率很高的交流电，再经变压器隔离、变压（升压或降压），然后经整流器整流，最后就可以得到新的、极性和数值各不相同的多组直流输出电压。电路从输出端取样，经放大后反馈至开关控制端，控制驱动电路的工作，最后达到稳定输出电压的目的，这种形式的开关电源在实际应用中最为广泛。

(9) 按电路结构分类。

1) 散件式开关电源。整个开关电源的电路都是采用分立元器件组成的，它的电路结构较为复杂，可靠性较差。

2) 集成电路式开关电源。整个开关电源电路或电路的一部分是由集成电路组成的，这种集成电路通常为厚膜集成电路。有的厚膜集成电路中包括开关管，有的则不包括开关管。这种电源的特点是电路结构简单、调试方便、可靠性高。

以上阐述的开关电源的品种都是站在不同的角度，以开关电源不同特点而分类的。尽管各种电路的激励方法、输出直流电压的调节手段、储能电感的连接方式、开关管器件种类以及串并联结构等各不相同，但是它们最后总可以归结为串联型开关电源和并联型开关电源这两大类。

### 1.1.2 开关型 DC/DC 变换器主电路结构

#### 1. 开关型 DC/DC 变换器中的储能元件

开关电源利用无源磁性元件和容性元件的能量存储特性，从输入电压源获取的能量，暂时地把



能量以磁场形式存储在电感器中,或以电场形式存储在电容器中,然后将能量转换到负载,以实现DC/DC变换。

实现能量从电源到负载的变换需要复杂的控制技术,现在,大多数开关电源采用PWM(脉冲宽度调制)控制技术。DC/DC变换器工作时输入端的能量随脉宽变化,在一固定周期内保持平均能量转换。PWM的占空因数 $D$ 是 $t_{on}$ 时间(从电源提取能量的时间)与总开关周期 $T$ 之比。对于开关电源,其稳定的输出电压正比于PWM占空因数。

在开关型DC/DC变换器中,功率开关和储能元件的物理尺寸直接受工作频率影响。磁性元件所耦合的功率是

$$P_{(L)} = \frac{1}{2}LI^2f \quad (1-1)$$

式中: $P_{(L)}$ 为磁性元件所耦合的功率; $L$ 为磁性元件的电感; $I$ 为流过磁性元件的电流; $f$ 为流过磁性元件电流的频率。

随着开关频率的提高,为保持恒定的功率所要求的电感相应地减小。由于电感与磁性材料的面积和线匝数有关,因此可以减小电感器的物理尺寸。

电容元件所耦合的功率是

$$P_{(C)} = \frac{1}{2}CU^2f \quad (1-2)$$

式中: $P_{(C)}$ 为磁性元件所耦合的功率; $C$ 为电容元件的电容容量; $U$ 为电容元件两端的电压; $f$ 为电容元件两端电压的频率。

随着开关频率的提高,储能电容器的容量和外形尺寸也相应地减小。元件容量和外形尺寸的减小,对于电源设计人员和系统设计人员来说都是非常重要的,可使得开关电源占用较小的体积和印制电路板面积。

## 2. 开关型DC/DC变换器拓扑结构

开关型DC/DC变换器的拓扑结构是指能用于转换、控制和调节输入电压的功率开关元件和储能元件的不同配置。开关电源拓扑结构可分为两种基本类型:非隔离型(在工作期间输入源和输出负载共用一个共同的电流通路)和隔离型[能量转换是用一个相互耦合磁性元件(变压器)来实现的,而且从电源到负载的耦合是借助于磁通而不是共同的电路]。开关型DC/DC变换器拓扑结构是根据系统造价、性能指标和输入/输出负载特性等因素选定的。

(1) 非隔离开关型DC/DC变换器。常用的四种非隔离开关型DC/DC变换器的输出电压( $U_o$ )和输入电压( $U_{in}$ )的关系如下:

1) 降压开关型DC/DC变换器。降压开关型DC/DC变换器将一输入电压变换成一较低的稳定输出电压。其输出电压和输入电压的关系为

$$U_o/U_{in} = D, U_{in} > U_o \quad (1-3)$$

式中: $U_o$ 为变换器输出电压; $U_{in}$ 为变换器输入电压; $D$ 为占空因数。

2) 升压开关型DC/DC变换器。升压开关型DC/DC变换器将一输入电压变换成一较高的稳定输出电压。其输出电压和输入电压的关系为

$$U_o/U_{in} = 1/(1-D), U_{in} < U_o \quad (1-4)$$

3) 逆向开关型DC/DC变换器。逆向开关型DC/DC变换器将一输入电压变换成一较低反相输出电压。其输出电压与输入电压的关系为

$$U_o/U_{in} = -D/(1-D), U_{in} > |U_o| \quad (1-5)$$

4) Cuk开关型DC/DC变换器。Cuk(丘克)开关型DC/DC变换器将一输入电压变换成一稳定



反相比较低值或较高值输出电压（电压值取决于占空比）。其输出电压输入电压的关系为

$$U_o/U_{in} = -D/(1-D), |U_{in}| > |U_o|, D < 0.5 \quad |U_{in}| < |U_o|, D > 0.5 \quad |U_{in}| > |U_o| \quad (1-6)$$

(2) 隔离开关型 DC/DC 变换器。隔离开关型 DC/DC 变换器拓扑结构有很多种，但其中三种比较通用，它们是反激隔离开关型 DC/DC 变换器、正激隔离开关型 DC/DC 变换器、推挽隔离开关型 DC/DC 变换器。在这些电路中，从输入电源到负载的能量转换是通过一个变压器或其他磁通耦合磁性元件来实现的。

1) 反激隔离开关型 DC/DC 变换器。反激隔离开关型 DC/DC 变换器无需磁复位措施，可将一输入电压变换成一稳定的取决于变压器匝数比的较低值或较高值的输出电压。其输出电压与输入电压的关系为

$$U_o/U_{in} = nD/(1-D), U_{in} > U_o \text{ 或 } U_{in} < U_o \quad (1-7)$$

式中： $n$  为变压器匝数比  $n = N_2/N_1$ 。

2) 正激隔离开关型 DC/DC 变换器。正激隔离开关型 DC/DC 变换器需要磁复位措施，可将一输入电压变换成一稳定的取决于变压器匝数比的较低值或较高值的输出电压。其输出电压和输入电压的关系为

$$U_o/U_{in} = nD, U_{in} > U_o \text{ 或 } U_{in} < U_o \quad (1-8)$$

3) 推挽隔离开关型 DC/DC 变换器。推挽隔离开关型 DC/DC 变换器可将一输入电压变换成一稳定较低值的输出电压。其输出电压与输入电压的关系为

$$U_o/U_{in} = (2/N)D, U_{in} > U_o \quad (1-9)$$

### 3. 斩波型 DC/DC 变换器的典型电路拓扑

最基本的降压斩波电路原理如图 1-4 所示，斩波器的负载为  $R$ ，当开关  $S$  合上时， $U_o = U_R = U_{in}$ ，并持续  $t_1$  时间。当开关断开时， $U_o = U_R = 0$ ，并持续  $t_2$  时间， $T = t_1 + t_2$  为斩波器的周期，斩波器的输出波形如图 1-4 (b) 所示。若定义斩波器的占空比  $D = t_1/T$ ， $t_1$  为斩波器导通时间， $T$  为通断周期。通常斩波器的工作方式有两种：①脉宽调制工作方式，维持  $T$  不变，改变  $t_1$ ；②脉频调制工作方式，维持  $t_1$  不变，改变  $T$ 。当占空比  $D$  从 0 变到 1 时，输出电压平均值从 0 变到  $U_{in}$ ，其等效电阻也随着占空比  $D$  而变化。

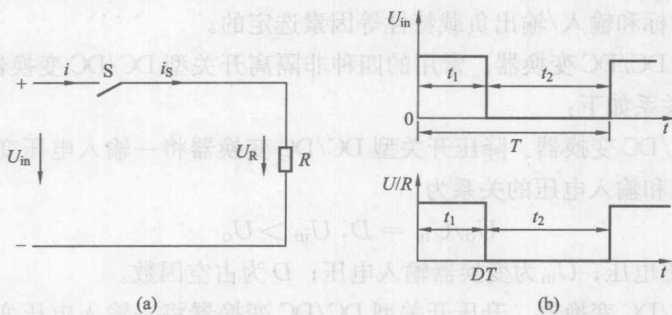


图 1-4 基本降压斩波电路

(a) 电路；(b) 波形

在开关电源设计中，普遍采用的是脉宽调制方式。因为频率调制方式容易产生谐波干扰，而且滤波器设计也比较困难。

(1) 降压式 (Buck) DC/DC 变换器。图 1-4 所示电路的输出纹波较大，为降低输出纹波，在输出端接入电感  $L$ 、电容  $C$ ，如图 1-5 所示。在图 1-5 中，VD 为续流二极管。其输出电压平均值

$U_o$  总是小于输入电压  $U_{in}$ 。通过电感中的电流  $i_L$  是否连续, 取决于开关频率、滤波电感  $L$  和电容  $C$  的数值。

当电路工作频率较高时, 若电感和电容量足够大并为理想元件, 电路进入稳态后, 可以认为输出电压为常数。当开关管 VT 导通时, 电感中电流呈线性上升, 因而有

$$U_{in} - U_o = L(i_{omax} - i_{omin})/t_{on} = L\Delta i_{on}/t_{on} \quad (1-10)$$

式中:  $t_{on}$  为开关管导通时间;  $i_{omax}$  为输出电流最大值;  $i_{omin}$  为输出电流最小值;  $\Delta i_{on}$  为开关管导通时间输出电流变量。

当开关管截止时, 电感中电流不能突变, 电感上感应电动势使二极管导通, 这时

$$U_o = L(i_{omax} - i_{omin})/t_{off} = L\Delta i_{off}/t_{off} \quad (1-11)$$

式中:  $t_{off}$  为开关管截止时间;  $\Delta i_{off}$  为开关管截止时间输出电流变量。

在稳态时

$$\Delta i_{on} = \Delta i_{off} = \Delta i \quad (1-12)$$

式中:  $\Delta i$  为输出电流变量。

因为电感滤波保持了直流分量, 消除了谐波分量。输出电流平均值为

$$I_0 = (i_{omax} + i_{omin})/2 = U_o/RL \quad (1-13)$$

式中:  $R$  为负载电阻。

(2) 升压式 (Boost) DC/DC 变换器。升压式 (Boost) DC/DC 变换器如图 1-6 所示, 它由开关管 VT、储能电感  $L$ 、二极管 VD 及滤波电容  $C$  组成。当开关管导通时, 电源向电感储能, 电感电流增加, 感应电动势为左正右负, 负载  $Z$  由电容  $C$  供电。当 VT 截止时, 电感电流减小, 感应电动势为左负右正, 电感中能量释放, 与输入电压一起经二极管向负载供电, 并同时向电容充电。这样把低压直流变换成高压直流。在电感电流连续的条件下, 电路工作于图 1-6 (b) 所示的两种状态。

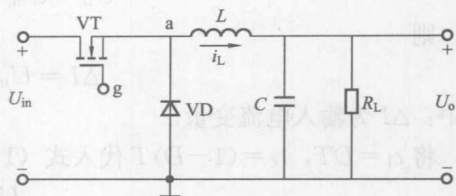
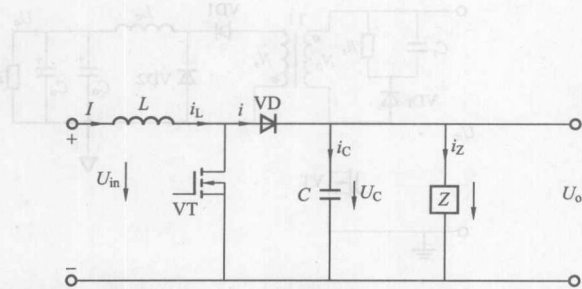
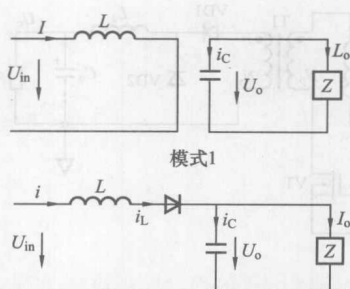


图 1-5 降压式 (Buck) DC/DC 变换器



(a)



(b)

图 1-6 升压式 (Boost) DC/DC 变换器

(a) 电路; (b) 等效电路

1) 当开关管导通、二极管截止 (即  $0 \leq t \leq t_1$ ) 期间,  $t_1 = 0 \sim DT$ ,  $t = 0$  时刻, VT 导通, 电感中的电流按直线规律上升  $U_{in} = L\Delta I/t_1$ 。

2) 当开关管由导通变为截止 (即  $t_1 \leq t \leq T$ ) 期间, 电感电流不能突变, 产生感应电动势迫使二极管导通, 此时

$$U_o - U_{in} = LI/t_2, t_2 = (1-D)T \quad (1-14)$$

则

$$\Delta I = U_{in}t_1/L = (U_o - U_{in})t_2/L \quad (1-15)$$

式中： $\Delta I$  为输入电流变量。

将  $t_1 = DT, t_2 = (1-D)T$  代入式 (1-15)，则求得

$$U_o = U_{in}/(1-D) \quad (1-16)$$

当占空比  $D$  从 0 趋近于 1 时， $U_o$  从  $U_{in}$  变到任意大。同理可求得

$$I = I_o/(1-D) \quad (1-17)$$

$$T = \Delta I L U_o / U_{in} (U_o - U_{in}) \quad (1-18)$$

$$\Delta I = U_{in} (U_o - U_{in}) / f L U_o = U_{in} D / f L \quad (1-19)$$

式中： $I$  为输入电流； $f$  为开关转换频率。

若忽略负载电流脉动，那么在  $[0, t_1]$  期间，电容上泄放的电荷量，反映了电容峰—峰电压脉动量，即输出电压  $U_o$  的脉动量。

(3) 单端正激 DC/DC 变换器。单端正激 DC/DC 变换器电路拓扑如图 1-7 所示，图中变压器 T1 起隔离和变压的作用，在输出端要加一个电感器  $L_o$ 。(续流电感)起能量的储存及传递作用，变压器初级需有复位绕组  $N_r$ 。在实际使用中，此绕组也可用 R、C、D 吸收电路取代，如果控制电路的辅助电源用反激供给则也可削去开关管的部分峰值电压(相当一部分复位绕组)。输出回路需有一个整流二极管 VD1 和一个续流二极管 VD2。因变压器使用无气隙的磁芯，故其铜损较小，变压器温升较低，并且其输出的纹波电压较小。

(4) 单端反激 DC/DC 变换器。单端反激 DC/DC 变换器电路拓扑如图 1-8 所示，图中变压器 T1 起隔离和传递储存能量的作用，即在开关管 VT 开通时  $N_p$  储存能量，开关管 VT 关断时  $N_p$  向  $N_s$  释放能量。在输出端需加由电感器  $L_o$  和两个电容  $C_o$  组成的低通滤波器，变压器初级有  $C_r$ 、 $R_r$  和 VD<sub>r</sub> 组成的 R、C、D 漏感尖峰吸收电路。输出回路需有一个整流二极管 VD1。因变压器使用有气隙的磁芯，其铜损较大，变压器温度相对较高，并且其输出的纹波电压比较大。但其优点是电路结构简单，适用于 200W 以下的电源。

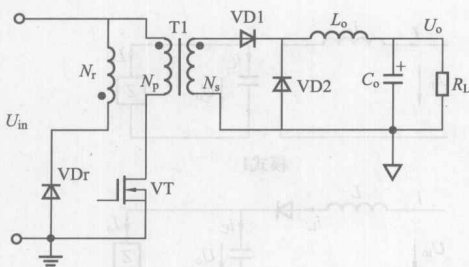


图 1-7 单端正激 DC/DC 变换器电路拓扑图

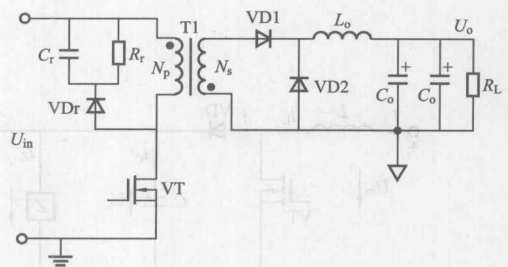


图 1-8 单端反激 DC/DC 变换器电路拓扑图

(5) 双管正激 DC/DC 变换器。双管正激 DC/DC 变换器电路拓扑如图 1-9 所示，图中变压器 T1 起隔离和变压的作用，在输出端要加一个电感器  $L_o$ 。(续流电感)起能量的储存及传递作用，变压器初级无需再有复位绕组，因为 VD1、VD2 的导通限制了两个开关管关断时所承受的电压。输出回路需有一个整流二极管 VD3 和一个续流二极管 VD4 (VD3、VD4 最好选用恢复时间快的整流管)。输出滤波电容  $C_o$  应选择低 ESR (等效电阻) 大容量，以利于降低纹波电压。

双管正激 DC/DC 变换器的工作特点有：

- 1) 在任何工作条件下，为使两个开关管所承受的电压不会超过  $U_{in}$ 、 $U_d$  ( $U_{in}$  为输入电压， $U_d$

为 VD1、VD2 的正向压降), VD1、VD2 必须是快恢复管 (恢复时间越短越好, 在实际设计和调试中多使用 MUR460)。

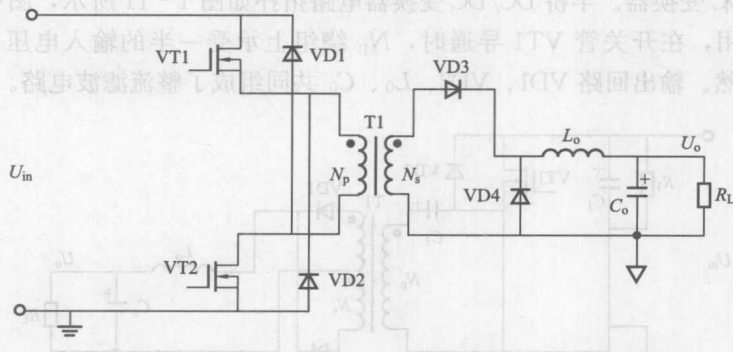


图 1-9 双管正激 DC/DC 变换器电路拓扑图

2) 与单端正激 DC/DC 变换器相比, 无需复位电路, 以利于简化电路和变压器设计。功率器件可选择较低的耐压值, 功率等级也会很大。

3) 两个开关管工作状态一致, 同时处于通态或断态。在大功率等级电源中选用此种电路, 其开关管比较容易选择, 比如选择 IRFP460、IRFP460A 等作为开关管即可。

(6) 双管反激 DC/DC 变换器。双管反激 DC/DC 变换器电路拓扑如图 1-10 所示, 图中变压器 T1 起隔离和传递储存能量的作用, 即在开关管 VT1、VT2 开通时  $N_p$  储存能量, 开关管 VT1、VT2 关断时  $N_p$  向  $N_s$  释放能量, 同时  $N_p$  的漏感将通过 VD1、VD2 返回给输入, 可省去 R、C、D 漏感尖峰吸收电路。在输出端要加由电感器  $L_o$  和两个电容  $C_o$  组成的低通滤波器。输出回路需有一个整流二极管 VD1。

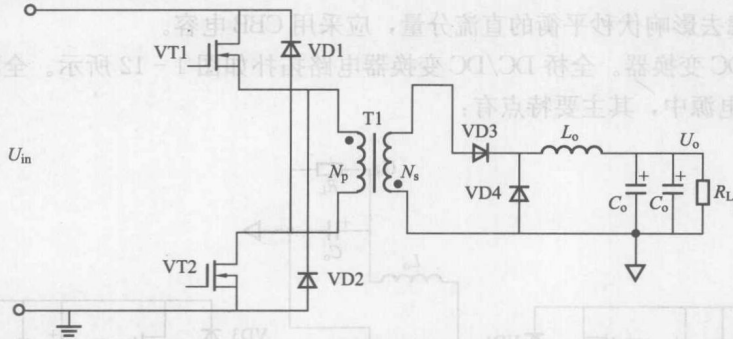


图 1-10 双管反激 DC/DC 变换器电路拓扑图

双管反激 DC/DC 变换器的工作特点有:

1) 在任何工作条件下, 为使两个开关管所承受的电压不会超过  $U_{in}$ 、 $U_d$ , VD2、VD3 必须是快恢复管。

2) 在反激开始时, 储存在原边  $N_p$  的漏电感能量会经 VD2、VD3 反馈给输入, 系统能量损失小, 效率高。

3) 与单端反激变换器相比, 无需 R、C、D 吸收电路。功率器件可选择较低的耐压值, 功率等级也会很大。

4) 在轻载时, 如果在“开通”周期储存在变压器原边绕组的能量过多, 那么在“关断”周期



会将过多的能量反馈到输入端。

5) 两个开关管工作状态一致，下管的波形会优于上管的波形。

(7) 半桥 DC/DC 变换器。半桥 DC/DC 变换器电路拓扑如图 1-11 所示，图中变压器 T1 起隔离和传递能量的作用，在开关管 VT1 导通时， $N_p$  绕组上承受一半的输入电压， $N_s$  绕组电压使 VD1 导通；反之亦然。输出回路 VD1、VD2、 $L_o$ 、 $C_o$  共同组成了整流滤波电路。

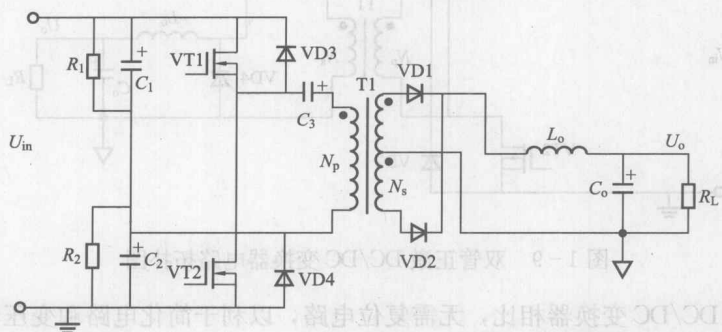


图 1-11 半桥 DC/DC 变换器电路拓扑图

此电路减小了原边开关管的电压应力，所以是目前比较成熟和常见的电路。

半桥 DC/DC 变换器的工作特点有：

- 1) 两个开关整管是相互交替打开的，所以两组驱动波形相位差要大于  $180^\circ$ ，但存在一定死区时间。
- 2)  $C_1 = C_2$ 、 $R_1 = R_2$ 。
- 3)  $C_1$ 、 $C_2$  主要用来自动平衡每个开关管的伏秒值，许多半桥 DC/DC 变换器的  $C_1$ 、 $C_2$  多选用高压铝电解电容，因为铝电解电容存在一个高频特性的问题，在实际应用中可采用 CBB 电容。
- 4)  $C_3$  主要是滤去影响伏秒平衡的直流分量，应采用 CBB 电容。

(8) 全桥 DC/DC 变换器。全桥 DC/DC 变换器电路拓扑如图 1-12 所示。全桥 DC/DC 变换器多用于大功率等级电源中，其主要特点有：

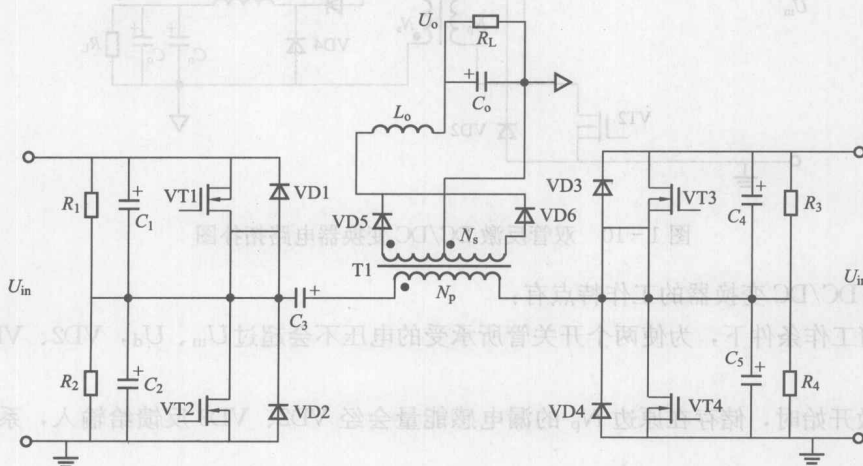


图 1-12 全桥 DC/DC 变换器电路拓扑图

- 1) 变压器利用率比较高，空载能量可以反馈给电网，电源效率高。