

 北极光



  
卓越工程师  
培养计划丛书

# 反激式开关电源 原理与设计

◎ 宁 武 曹洪奎 孟丽因 编著    ◎ 陈永真 主审



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

卓越工程师培养计划丛书

# 反激式开关电源 原理与设计

宁 武 曹洪奎 孟丽因 编 著  
陈永真 主 审

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

## 内 容 简 介

本书所涉及的内容是基本变换器中的反激式变换器，也称为“反激式开关电源”。面向实际电路设计的应用背景，针对如何理解与更好地设计单管变换器进行详尽的论述，并给出设计实例。本书详尽地介绍了反激式开关电源的基本知识、单管变换器的基本知识，级联、隔离型的各种演化电路；基本电路单元的设计与选择，包括功率器件和电容器的选型；深入探讨缓冲电路的问题，并简略介绍准谐振工作原理；给出一些常见隔离型变换器的设计实例；对应隔离型谐振型变换器的设计并给出应用实例；常规技术的单片开关电源市电供电的 LED 驱动电路设计详解；反激式变换器变压器的设计，包括磁芯的选择和绕线方法。

本书适合电气工程、电子工程及相关领域的研发设计人员阅读，可作为电类各专业及反激式变换器相关领域的高校学生和教师学习的参考用书，也可作为功率变换电路专业培训班的教材。

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

反激式开关电源原理与设计/宁武, 曹洪奎, 孟丽因编著. —北京: 电子工业出版社, 2014. 7  
(卓越工程师培养计划丛书)

ISBN 978-7-121-21436-3

I. ①反… II. ①宁… ②曹… ③孟… III. ①开关电源-设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 156371 号

策划编辑: 柴 燕 (chaiy@phei.com.cn)

责任编辑: 周宏敏 文字编辑: 张 迪

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 北京京科印刷有限公司

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: 12 字数: 307.2 千字

版 次: 2014 年 7 月第 1 版

印 次: 2014 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 2 500 册 定价: 48.00 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 zllts@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

将直流电能转换成所需要的直流电能或交流电能的电路通常被称为功率变换器，而构成多种多样电路拓扑结构的功率变换器都是由基本变换器演化组合得到的。本书介绍的反激式变换器是基本变换器之一，以其控制方式、电路最简单和可靠性最高而得到广泛应用，特别是在小功率电源和多输出的电源适配器等应用场合。

实际上，基本变换器有3种，即降压型变换器（英文缩写为 Buck）、升压型变换器（英文缩写为 Boost）和反极性变换器（也可以称为反激式变换器，英文缩写为 Flyback）。尽管很多文献说基本变换器除此之外还有 CUK、SEPIC、Zet，但是通过分析与推演，前面提到的 CUK 变换器实际上是升压型变换器与降压型变换器的组合，SEPIC 变换器是升压型变换器与反激式变换器的组合，而 Zet 变换器则是反激式变换器与降压型变换器的组合。这样，CUK、SEPIC、Zet 就不应该列为基本变换器。不仅如此，各种非隔离型变换器（如升压型级联、反激式级联、反激式与降压型级联）及各种隔离型变换器都可以通过演化的方式从基本变换器的演化中得到。这样做不仅可以使变换器的理论大为简化（可以清楚各种变换器是怎样得到的），而且也使电路分析简化。

如何设计一个性能优异的反激式变换器，需要清楚反激式变换器的原理和特性，这样可以避免因电路性能所限而使样机达不到预期的指标。除了正确选择反激式变换器电路的拓扑结构外，还要正确选择相关的元器件。元器件是影响整机性能的另一个关键，不仅要正确选择有源器件，更要正确选择无源器件，特别是电容器和电感。不同的控制方式也会得到不同的性能和经济指标。因此，还要针对要求选择恰当的控制方式。

本书详尽地分析和推演了基本反激式变换器的原理和由基本反激式变换器演化而得到的各种级联反激式变换器、隔离反激式变换器及级联隔离型反激式变换器，为后面各类反激式变换器的原理、分析及其设计打下理论基础；论述了主要元件的选择与选择依据；缓冲电路的作用与原理、RCD 缓冲电路及电压瞬变二极管缓冲钳位的作用与设计，指出 RCD 缓冲电路及电压瞬变二极管缓冲钳位的能量损耗对变换器效率的影响；如何获得无源无损耗缓冲电路的思路，几种无源无损耗缓冲电路原理、如何实现和设计方法；各类隔离型单管变换器原理、电路结构与细节、主要元件的选择与设计、调试要点，TOP Switch 的应用要点、应用 UC3842 控制芯片的单管变换器设计、双管钳位变换器、极宽输入电压范围的开关稳压电源、自激型反激式变换器的设计实例；准谐振单管变换器的基本设计方法，如由 IRIS4015 构成

的准谐振反激式变换器原理、设计方法与实例，由 MA8000 系列构成的单管反激式变换器原理、设计方法与实例，用 UC3842 构成的准谐振反激式变换器原理、设计方法与实例，开关电源并联的方法与并联后对性能指标的影响；最常见的非隔离型变换器芯片的原理和应用及注意事项，如 MC34063 的原理、设计方法及其应用实例，由早期 L 系列芯片构成的降压型变换器原理、设计方法及其应用实例；改进后的 L496X 系列芯片的原理、设计方法及其应用实例，应用 MOSFET 作为开关管的 L497X 原理、设计方法及其应用实例，电路最简洁的 LM2575/2576/2577 芯片原理、设计方法及其应用实例；变压器的设计、变压器的结构对变压器的性能影响、电流断续和电流连续状态下的反激式变换器变压器的设计、正激变换器变压器的设计、如何正确快捷地选择变压器磁芯。

本书共分 7 章，由辽宁工业大学宁武、曹洪奎和孟丽因合作编著。全书由宁武拟订大纲并编写了第 1、2、7 章，曹洪奎编写了第 4、6 章，孟丽因编写了第 3、5 章。在本书的编著过程中，得到了中国电源学会常务理事辽宁工业大学陈永真教授的大力支持与指导，并对本书进行了仔细的审阅，提出许多宝贵的修改建议，在此表示衷心的感谢！

本书得到了电源技术的前辈们的关怀与支持，在此，对这些前辈深表感谢！另外，本书能顺利出版，有赖于电子工业出版社的支持与帮助，在此致以深切的感谢！

作者希望通过本书能对读者在各类反激式变换器的设计方面有实质性的帮助，对初学者在反激式变换器的原理与设计方面的入门能够起到很好的引导作用，这是作者的最大愿望。

由于编著者水平所限，书中内容难免存在不完善、不妥之处，诚恳地希望广大读者批评指正，作者不胜感激。

编 著 者  
2014 年 3 月



# 目 录

<b>第 1 章 反激式开关电源基本知识</b> .....	1
1.1 基本反激式变换器的电路运行原理与电磁能量转换原理 .....	1
1.2 反激式变换器的演化 .....	5
1.2.1 基本变换器的等效变换 .....	5
1.2.2 Flyback 变换器的级联.....	5
1.3 反激式变换器向隔离型的演化 .....	7
1.3.1 Flyback 变换器的隔离型演化 .....	7
1.3.2 Flyback 变换器级联的隔离型演化 .....	8
<b>第 2 章 基本电路单元的设计与选择</b> .....	9
2.1 交流输入回路的设计与选择 .....	9
2.1.1 浪涌电流抑制电路 .....	9
2.1.2 电源滤波器 .....	10
2.1.3 整流器的选择 .....	13
2.1.4 滤波电容器额定电压的选择 .....	14
2.1.5 滤波电容器容量的选择 .....	14
2.1.6 一般铝电解电容器可以承受的纹波电流和可能出现的实际纹波电流 .....	15
2.1.7 直流输入回路的选择 .....	16
2.2 主开关与控制回路的选择.....	19
2.2.1 主开关的选择 .....	19
2.2.2 主开关管额定电压的选择 .....	20
2.3 输出整流器的选择.....	20
2.3.1 输出整流器的额定电流 .....	20
2.3.2 输出整流器的额定电压 .....	21
2.4 输出滤波电容器的选择.....	21
2.4.1 输出滤波电容器的工作状态 .....	21
2.4.2 电容器在高频整流滤波的等效电路 .....	22
2.4.3 电容器在高频整流滤波的作用 .....	22
2.4.4 滤波电容器的电流承受能力 .....	23
2.4.5 正确选择滤波电容器 .....	25
<b>第 3 章 缓冲电路问题</b> .....	29
3.1 缓冲电路作用及原理.....	29
3.1.1 问题的提出 .....	29
3.1.2 缓冲电路原理 .....	30
3.1.3 开关管应力的转移 .....	31

3.2	RCD 缓冲电路设计 .....	32
3.2.1	Boost 型缓冲电路的设计 .....	32
3.2.2	Flyback 型缓冲电路的设计 .....	32
3.3	开关损耗问题 .....	33
3.4	无源无损耗缓冲电路 .....	33
3.4.1	单管无源无损耗缓冲电路 (一) .....	34
3.4.2	单管无源无损耗缓冲电路 (二) .....	36
3.4.3	双管钳位无源无损耗缓冲电路 .....	38
3.5	单端反激式变换器的准谐振工作方式 .....	43
3.5.1	准谐振工作原理 .....	43
3.5.2	缓冲电容电压极小值的检测 .....	46
<b>第 4 章</b>	<b>隔离型变换器的设计实例 .....</b>	<b>48</b>
4.1	TOPSwitch 的应用要点 .....	48
4.1.1	不要迷信 TOPSwitch 的指标 .....	48
4.1.2	为什么 TOPSwitch 做的开关电源的输出电压尖峰很小 .....	48
4.1.3	TOPSwitch 能做正激式开关电源吗 .....	49
4.1.4	TOPSwitch - GX 系列的特点与应用 .....	49
4.2	应用 DPA - Switch 实现高效率 DC/DC 反激式变换器的设计实例 .....	52
4.2.1	应用 DPA - Switch 实现高效率 DC/DC 反激式变换器的设计电路 .....	52
4.2.2	电路中各元器件的特殊要求 .....	54
4.2.3	变压器的设计 .....	57
4.2.4	应用 DPA - Switch 实现高效率 DC/DC 正激式变换器的设计实例 .....	60
4.2.5	应用 DPA - Switch 实现具有同步整流器的高效率 DC/DC 变换器的设计实例 .....	66
4.2.6	DPA - Switch 的效率分析 .....	69
4.3	应用 UC3842 控制芯片的单管变换器设计 .....	69
4.3.1	UC3842 系列的一般特性 .....	69
4.3.2	UC3842 最常见的应用方式 .....	73
4.4	双管钳位变换器 .....	75
4.4.1	控制集成电路的选择 .....	75
4.4.2	栅极驱动电路 .....	76
4.4.3	双管钳位反激式变换器 .....	77
4.5	极宽输入电压范围的开关稳压电源 .....	78
4.5.1	问题的提出 .....	78
4.5.2	解决方案 1: 交直流独立输入方式 .....	78
4.5.3	解决方案 2: 共用输入单管变换方式 .....	82
4.5.4	解决方案 3: 极宽输入电压范围的单管变换方式 .....	84
4.6	自激型反激式变换器的设计 .....	87
4.6.1	自激型反激式变换器的基本原理 .....	87
4.6.2	开关性能的改善 .....	89

4.6.3	如何实现稳压	90
4.6.4	开关管的最大集电极电流限制	92
4.6.5	主开关管采用 MOSFET 的自激型变换器	92
4.6.6	变压器一次侧电感与开关频率	93
4.6.7	自激式变换器的变压器设计	94
4.6.8	无源无损耗缓冲电路与准谐振工作方式的实现	95
<b>第 5 章</b>	<b>隔离型谐振型变换器的设计</b>	<b>97</b>
5.1	由 IRIS4015 构成的准谐振反激式变换器原理与设计	97
5.1.1	电路的启动	97
5.1.2	限流工作方式	98
5.1.3	电压反馈模式	99
5.1.4	准谐振工作方式	100
5.1.5	轻载工作条件的改善	101
5.1.6	变压器的设计	102
5.1.7	实用电路及测试数据	103
5.1.8	应用电路	107
5.2	由 MA8000 系列构成的单管反激式变换器原理与设计	110
5.2.1	准谐振工作方式需要注意的问题	110
5.2.2	MA8000 原理说明	110
5.2.3	MA8000 的基本应用	110
5.2.4	MA8000 的应用设计步骤	113
5.3	隔离型低纹波电压开关稳压电源设计实例（应用准谐振技术）	117
5.3.1	应用 NCP1207A/B 需要考虑的问题	117
5.3.2	用 NCP1207A/B 构成的准谐振式开关电源设计	127
5.4	开关电源的功率合成	131
5.4.1	最大输出能力自限功能	131
5.4.2	功率分配	132
5.4.3	时钟与尖峰	133
5.4.4	可靠性	134
<b>第 6 章</b>	<b>常规技术的单片开关电源市电供电的 LED 驱动电路设计详解</b>	<b>135</b>
6.1	反激式变换器的变压器设计	135
6.1.1	电流断续型的变压器设计	135
6.1.2	电流连续/断续时的变压器设计	137
6.2	NCP10 × × 系列单片开关电源的特点与性能分析	138
6.3	利用 5V/1A 充电器作为 HB LED 驱动器	140
6.3.1	全电压范围的 HB LED 驱动器电路	140
6.3.2	全电压范围的变压器设计	142
6.3.3	通过近似的快捷计算获得变压器的参数	142
6.3.4	电路板图	144



6.3.5	问题分析	144
6.4	全球通用电源 0.7A/10V 输出的 HB LED 驱动器设计	145
6.4.1	电路原理	146
6.4.2	变压器设计	146
6.4.3	电路板图设计	148
6.4.4	元器件明细	149
6.4.5	测试结果及分析	150
6.5	“隔离型” 12V/1A 的 HB LED 驱动电路设计	152
6.6	功率因数改进的 HB LED 驱动电路设计	153
6.6.1	采用 LC 滤波的功率因数校正解决方案	154
6.6.2	采用逐流式功率因数校正的解决方案	155
6.7	应用 Tiny Switch 的 HB LED 驱动电路设计与点评	156
6.7.1	应用 Tiny Switch 的 HB LED 驱动电路分析	156
6.7.2	元器件明细	158
6.7.3	变压器的绕制	159
6.7.4	测试结果分析	160
6.7.5	对采用 Tiny Switch 构成的 HB LED 驱动电路的评价	166
6.8	应用 LINK Switch 的 HB LED 驱动电路设计与点评	167
6.8.1	应用 LINK Switch 的 7.6V/700mA 的 HB LED 驱动电路	167
6.8.2	元器件明细	168
6.8.3	变压器的绕制	169
6.8.4	测试结果分析	169
6.8.5	简化版解决方案	173
<b>第 7 章</b>	<b>变压器的设计</b>	<b>174</b>
7.1	变压器的结构	174
7.2	正激式变换器的变压器设计	175
7.3	变压器磁芯的选择	176
<b>参考文献</b>		<b>181</b>

# 第 1 章 反激式开关电源基本知识

基本 DC/DC 变换器实际只有 3 种基本形式，即 Buck、Boost、Invertor（多称为 Flyback），其余的变换器形式均是在这几种基本 DC/DC 变换器的基础上演化而得的。例如，级联变换器就是在这几种基本 DC/DC 变换器的基础上演化而得到的（如 CUK、SEPIC、Zeta、Flyback 的级联、Flyback 与 Buck 的级联、Boost 的级联等），另外还有隔离变换器（如隔离型反激式变换器和正激变换器的单管 RCD 钳位、单管钳位、绕组钳位、双管钳位；桥式变换器的半桥变换器、全桥变换器和推挽变换器等）和能量双向传输变换器等。因此，只要弄清楚基本 DC/DC 变换器的工作原理，就可以在基本 DC/DC 变换器的基础上通过“演化”的思路得到其他拓扑形式变换器的工作原理，也可以在基本 DC/DC 变换器工作原理的基础上通过不同形式的组合变异演化出满足各种不同性能要求的新型 DC/DC 变换器。本书所涉及的内容是基本 DC/DC 变换器中的反激式变换器，也称为反激式开关电源。

为什么要用反激式开关电源？原因很简单——电路相对其他拓扑电路最简单，元器件最少，元器件成本最低，占用电路板面积最小，还有就是输出端的电磁干扰相对最小。

在多数情况下，开关电源是与输入端隔离的，即“off line”，翻译成中文的原意应该是“与市电隔离”，而不是“离线”、“脱机”等中文表达。其中的“line”指的是传输市电的电线。隔离型开关电源的第二个作用就是通过适当的方式实现直流电的电压改变，如同交流电中的变压器那样改变交流电的电压。

AC 电压变换是通过变压器（Transformer）实现的。转换原理是交变电场产生交变磁场和其相反过程，即  $e = d\varphi/dt$ ，无论是电生磁还是磁生电，均符合这一原理。在 DC 变换器中，如果还沿用上述原理，则会发现虽然在变压器的一次侧能够产生磁通  $\varphi$ ，但  $e = \text{const}$ （恒定不变）所产生的磁通  $\varphi$  是恒定的，即  $d\varphi/dt = 0$ ，所以二次侧的感生电势  $e = 0$ 。因此，从工作原理上说明了普通变压器不能用于 DC 变换器。既然有了磁链变化产生感生电势，就不要说“切割磁力线”这种仅仅在入门时的提法和概念，因为变压器的磁路中并没有切割磁力线，但是产生了感生电势，这是最好的说明。

不仅如此，当一种形式的交流电（频率、波形）向另一种交流电（频率、波形）转换时也不能简单地利用变压器实现。因此，有必要研究能按要求将一种电能形式转换为另一种电能形式的变换器——基本变换器。

## 1.1 基本反激式变换器的电路运行原理与电磁能量转换原理

与变压器相似，基本 DC/DC 变换器也能实现反极性。当输出与输入需要反极性时，可以采用 Flyback 变换器。Flyback 变换器的应用仅次于 Buck 变换器，可以实现各种功能。与

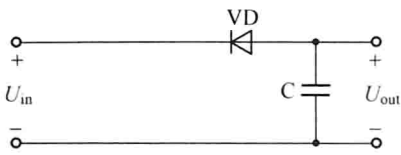


图 1.1 输入/输出间接入二极管

升压型类似，应防止输入直接向输出灌电流，输入与输出端应单向导电，实现这一功能，可利用二极管实现，如图 1.1 所示；由于输入/输出反极性，输入/输出电流方向相反（相对），因此电感接入的位置应如图 1.2 所示，开关管的位置如图 1.3 所示，即 Flyback 变换器（反激式变换器）电路，电路中的极性为参考方向。

电路中的极性为参考方向。

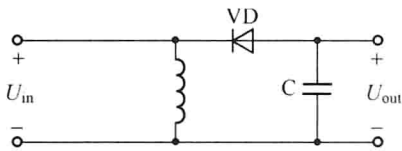


图 1.2 电感的接入

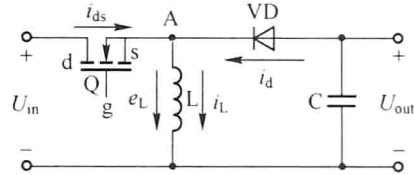


图 1.3 Flyback 变换器电路

### 1. 电路运行原理与电磁能量转换原理

(1) Q 导通期间：开关管导通期间的等效电路如图 1.4 所示， $U_A = U_{in}$ ，VD 反偏不导通， $U_{in} = L \frac{di_L}{dt}$ ， $U_{in} > 0$ ， $\frac{di}{dt} > 0$ ， $i$  上升， $\frac{1}{2}Li^2$  上升，L 将输入电能转化为磁储能，电感储能增加。输出端所接负载由输出电容供电。

(2) Q 关断期间：开关管关断期间的等效电路如图 1.5 所示，VD 导通， $U_{out} = L \frac{di}{dt} < 0$ ， $i$  下降， $\frac{1}{2}Li^2$  下降，电感向输出端释放储能转变为电能，由输出电容吸收电感所释放储能对应的功率中大于输出端所接负载上功率的部分。

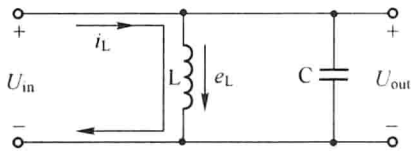


图 1.4 开关管导通期间的等效电路

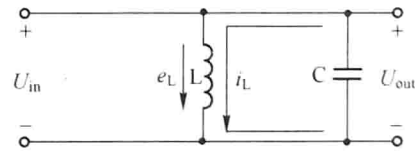


图 1.5 开关管关断期间的等效电路

### 2. 电路特点

$U_{in}$  从不向  $U_{out}$  直接提供电能，而是将  $U_{in}$  输入的电能转化为 L 中的磁储能，再通过 Q 关断期间，将磁储能转化为电能传送到负载和输出电容，其中输出电容吸收大于负载功率的那部分能量。

### 3. 主要波形

Flyback 变换器的主要波形如图 1.6 所示。

由图 1.6 所示的波形及图 1.2 所示的电路原理可以看出各主要元件上的电压和电流分别如下。

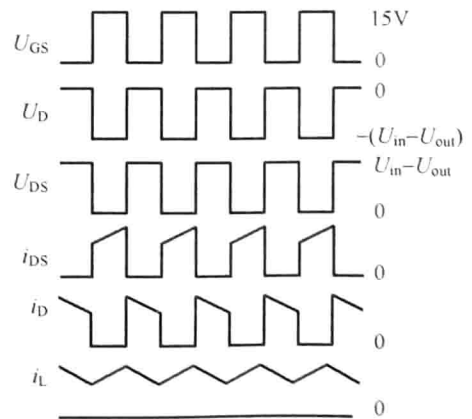


图 1.6 Flyback 变换器的主要波形

开关管 Q 电压峰值:

$$U_{\text{DSM}} = U_{\text{in}} - U_{\text{out}} \quad (1-1)$$

或

$$U_{\text{DSM}} = \frac{U_{\text{in}}}{1-D} \quad (1-2)$$

二极管 VD 电压峰值:

$$U_{\text{DM}} = U_{\text{in}} - U_{\text{out}} \quad (1-3)$$

或

$$U_{\text{DM}} = \frac{U_{\text{in}}}{1-D} \quad (1-4)$$

开关管 Q 电流峰值:

$$I_{\text{DM}} = I_{\text{inm}} \quad (1-5)$$

二极管 VD 电流峰值:

$$I_{\text{DM}} = I_{\text{inm}} \quad (1-6)$$

#### 4. 定量关系

(1) 方法 1, 直观法。

$$I_{\text{DS}} = I_{\text{in}} = D \cdot I_{\text{L}} \quad (1-7)$$

$$I_{\text{D}} = (1-D)I_{\text{L}} = -I_{\text{out}} \quad (1-8)$$

$$U_{\text{in}} \cdot I_{\text{in}} = U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} \quad (1-9)$$

$$U_{\text{in}} \cdot I_{\text{in}} = U_{\text{in}} \cdot D \cdot I_{\text{L}} \quad (1-10)$$

$$U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} = U_{\text{out}} \cdot (-1) \cdot (1-D)I_{\text{L}} = U_{\text{in}} \cdot D \cdot I_{\text{L}} \quad (1-11)$$

$$U_{\text{out}} = \frac{-D}{1-D}U_{\text{in}} \quad (1-12)$$

(2) 方法 2, 利用能量守恒的原理。

$$A_{\text{in}} = \int_0^T U_{\text{in}} \cdot i_{\text{L}}(t) dt = \int_0^{t_{\text{on}}} D \cdot U_{\text{in}} i_{\text{L}}(t) dt = D \cdot U_{\text{in}} \int_0^{t_{\text{on}}} i_{\text{L}}(t) dt \quad (1-13)$$

$$\frac{A_{\text{in}}}{T} = D \frac{U_{\text{in}}}{T} \int_0^{t_{\text{on}}} i_{\text{L}}(t) dt = D \cdot I_{\text{L}} \cdot U_{\text{in}} \quad (1-14)$$

$$A_{\text{out}} = \int_{t_{\text{off}}}^T U_{\text{out}} i_{\text{out}} dt = U_{\text{out}} \int_{t_{\text{off}}}^T i_{\text{L}} dt \quad (1-15)$$

$$\frac{A_{\text{out}}}{T} = U_{\text{out}} \frac{1}{T} \int_{t_{\text{off}}}^T i_{\text{L}} dt = U_{\text{out}} I_{\text{d}} \quad (1-16)$$

$$I_{\text{d}} = -\frac{t_{\text{off}}}{T} I_{\text{L}} = -(1-D)I_{\text{L}} \quad (1-17)$$

$$U_{\text{out}} [-(1-D)] I_{\text{L}} = D \cdot I_{\text{L}} \cdot U_{\text{in}} \quad (1-18)$$

$$U_{\text{out}} = -\frac{D}{1-D}U_{\text{in}} \quad (1-19)$$

适用条件为电感电流连续。

电感电流断续，以上公式不适用，但输入和输出关系符合能量守恒，3种变换器工作在电流断续状态时的主要波形如图 1.7 至图 1.9 所示，由图可以得到输入与输出之间的关系为

$$\text{Buck: } U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} = \frac{1}{2} U_{\text{in}} \cdot I_{\text{M}} \cdot \frac{t_1}{T} \quad (1-20)$$

$$\text{Boost: } U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} = \frac{1}{2} U_{\text{in}} \cdot I_{\text{M}} \cdot \frac{t_1 + t_2}{T} \quad (1-21)$$

$$\text{Flyback: } U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} = \frac{1}{2} U_{\text{in}} \cdot I_{\text{M}} \cdot \frac{t_1}{T} \quad (1-22)$$

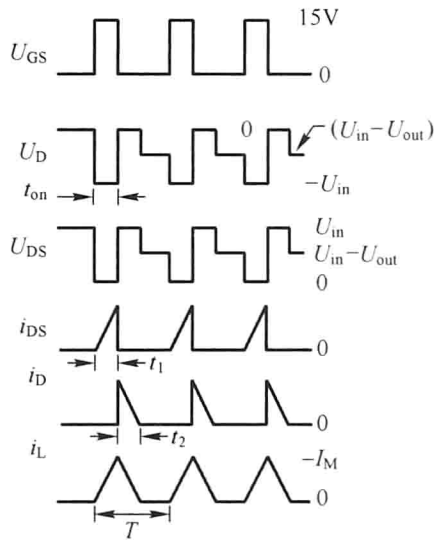


图 1.7 电流断续时 Buck 变换器的波形

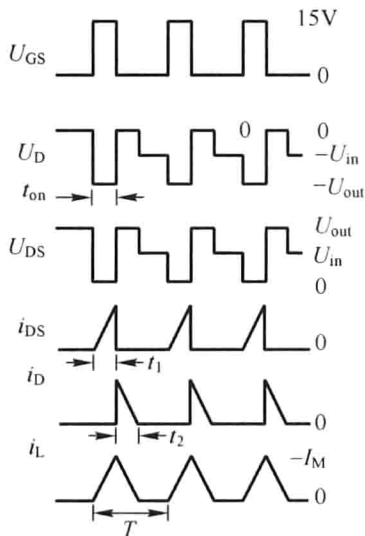


图 1.8 电流断续时 Boost 变换器的波形

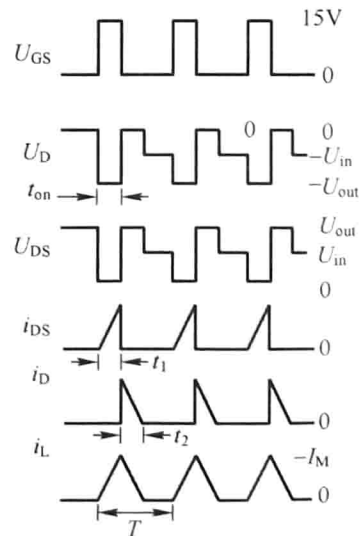


图 1.9 电流断续时 Flyback 变换器的波形



## 1.2 反激式变换器的演化

### 1.2.1 基本变换器的等效变换

利用 1.1 节讲述的 3 种基本变换器的等效变换和不同组合，可以演化出多种派生变换器，其基本原则为：只用一个开关，以简化控制方式，或将开关用一开关网络替代。

基本 DC/DC 变换器演化的准则为：在不考虑输入/输出参考电位关系的条件下，输入/输出电压关系不变，电路的拓扑结构关系不变，即等效变换。在这个基本准则下，电路的演化可以通过元件的易位实现。图 1.10 所示为 Flyback 等效变换的各电路。

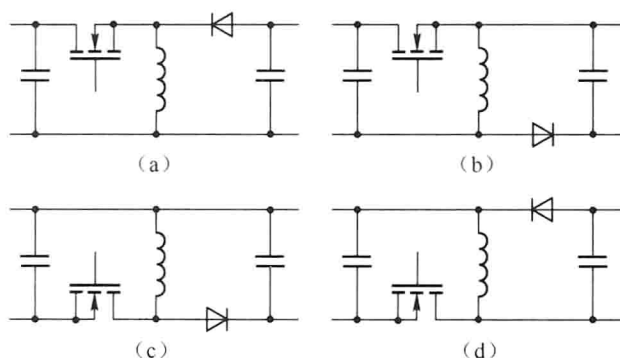


图 1.10 Flyback 等效变换的各电路

虽然电路中元件的位置发生变化，但由于电路的拓扑关系没变，输入/输出电压关系没变，所以演化后的电路与演化前的电路是等效的。由于电路中的开关管实际上是单向导电的，所以在开关管上串联二极管后等效，变换关系依然成立。

### 1.2.2 Flyback 变换器的级联

将两个 Flyback 电路组合后可以得到单开关 Flyback 电路的级联，其演化过程如图 1.11 所示。

#### 1. 演化过程

首先将图 1.11 (a) 中 Flyback 变换器的前后开关管移位，得到图 1.11 (b)。由于第二级的输入极性与第一级的输出极性相反，所以需要反极性。然后将图 1.11 (b) 后面的 Flyback 变换器的输入极性反向，使其与前级的输出极性相同，同时，电路中的开关管和二极管的输出极性均随之改变，得到图 1.11 (c)；移动左边电路的 Q1、L1、C1、VD1 和右边电路的 Q2，得到图 1.11 (d)。从图 1.11 (d) 可以看到，图中左边电路的右侧与右边电路的左侧是相同的。因此可以将两者合并，得到级联型 Flyback 变换器，如图 1.11 (f) 所示。需要注意的是，在演化过程中，在图 1.11 (e) 的第二级回路中加一个二极管 VD3，以阻止与第一级连接后在 Q 关断期间第一级的电流窜入第二级。这样，级联型 Flyback 变换器的输入/输出关系为

$$U_{\text{out}} = \frac{-D}{1-D} \cdot \frac{-D}{1-D} \cdot U_{\text{in}} = \left( \frac{D}{1-D} \right)^2 \cdot U_{\text{in}} \quad (1-23)$$

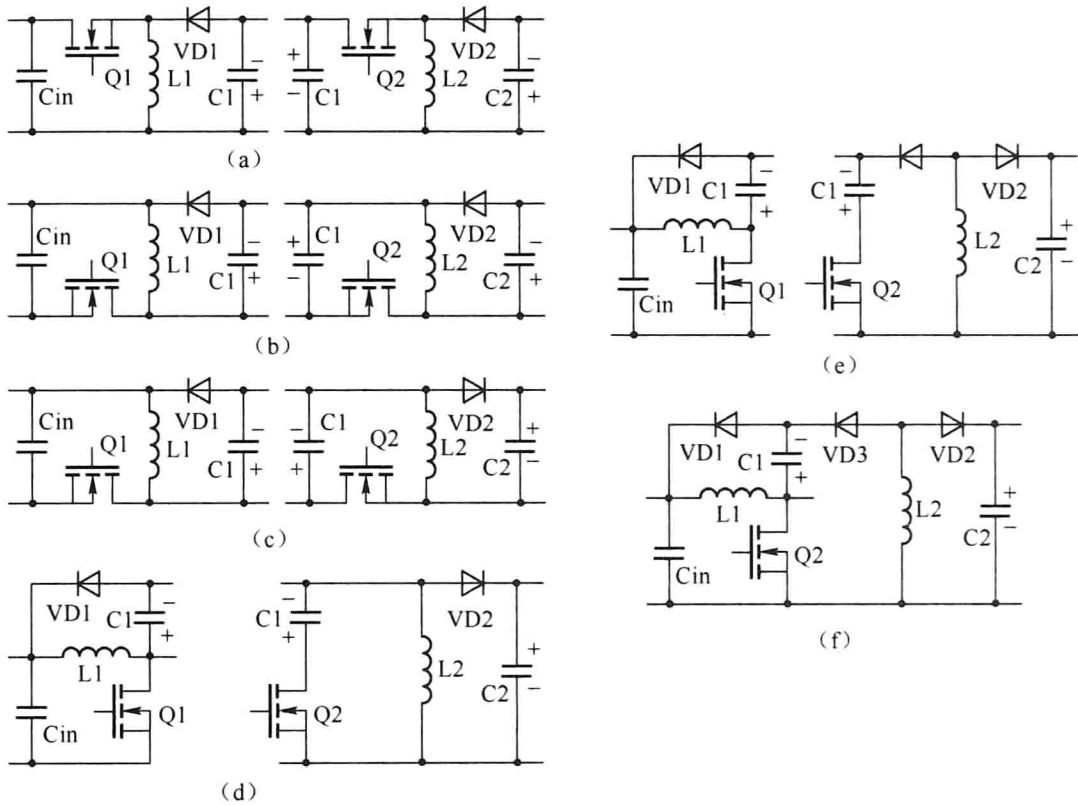


图 1.11 Flyback 电路的级联

从式 (1-23) 中可以看出, 这种电路形式在大降压比 (如 10 ~ 40) 仍能保持较大的占空比, 提高了开关管及储能元件的利用率。

## 2. 主要元件承受电压和电流分析

开关管电压峰值:

$$U_{\text{DSM}} = \frac{1}{1-D} U_{\text{in}} \quad (1-24)$$

二极管电压峰值:

$$U_{\text{DM}} = \frac{1}{1-D} U_{\text{in}} \quad (1-25)$$

耦合电容电压峰值:

$$U_{\text{C}} = \frac{1}{1-D} U_{\text{in}} \quad (\text{为直流电压}) \quad (1-26)$$

均与 Boost 变换器相同。其中, 开关管电流峰值:

$$I_{\text{DSM}} = I_{\text{L1M}} + I_{\text{L2M}} \quad (1-27)$$

二极管电流峰值:

$$I_{\text{DM}} = I_{\text{L2M}} \quad (1-28)$$

耦合电容电流:

$$I_{\text{CM}} \text{ 或 } I_{\text{L1M}} \quad (1-29)$$

### 1.3 反激式变换器向隔离型的演化

变压器不仅可以变压、升压、降压和反极性，还可以隔离。同样，DC/DC 变换器也应具有隔离功能。隔离型 DC/DC 变换器均由基本 DC/DC 变换器演化而来，因而通过研究基本 DC/DC 变换器的演化就可以得到隔离型 DC/DC 变换器。其他电源输入形式的隔离型变换器均以隔离型 DC/DC 变换器为基础推演而来。

#### 1.3.1 Flyback 变换器的隔离型演化

由于 Flyback 变换器是通过电感向输出端传递电能的，因此 Flyback 变换器的隔离型演化可以考虑将电感分解为在同一磁路的两个耦合电感，这样既可以保证原 Flyback 变换器的工作模式不变，又可以实现电气隔离。在这样的指导思想下，Flyback 变换器的隔离边界就是电感本身，如图 1.12 (a) 所示。Flyback 变换器的隔离型演化过程为：将电感分解为在同一磁路的两个耦合电感，如图 1.12 (b) 所示，即完成 Flyback 变换器的隔离演化的全部过程。

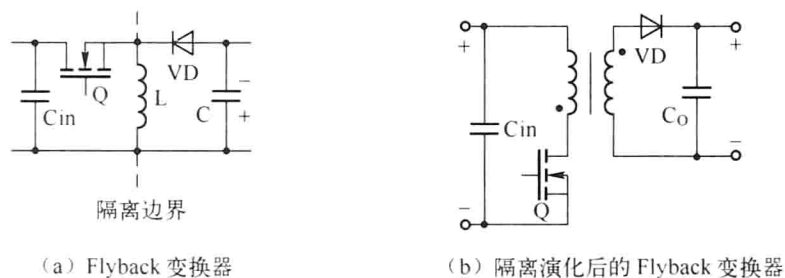


图 1.12 Flyback 变换器的隔离演化

由上述分析和图 1.12 可以看到，Flyback 变换器的隔离演化过程和电路最简单，不需要专门配置隔离用的变压器。由于 Flyback 变换器在开关管关断期间电感向输出端释放储能，自然地完成了“变压器”的磁通复位问题，所以不需要专门设置变压器的磁通复位电路。

读者可能会有疑问，Flyback 变换器不也是有像隔离型 Buck 变换器（正激变换器）那样的什么 RCD 钳位、瞬变电压抑制二极管钳位、绕组钳位、双管钳位等电路的拓扑结构嘛，实际上，在 Flyback 变换器中，上述这些钳位电路的作用仅仅是抑制“变压器”漏感造成的电压尖峰、吸收“变压器”漏感的能量作用。

那么，隔离型 Buck 变换器是否也可以采用 Flyback 钳位方式实现变换器的磁通复位？答案是肯定的，而且已经有电源产品采用这种电路的拓扑结构，电路如图 1.13 所示。

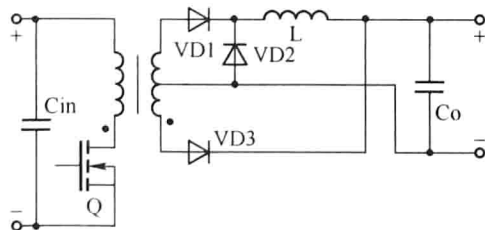


图 1.13 利用 Flyback 复位方式的隔离型 Buck 变换器

### 1.3.2 Flyback 变换器级联的隔离型演化

当输入电压的变化范围很大时（如 5 倍以上），隔离型 Flyback 级联变换器（图 1.14）将是最佳选择方案。

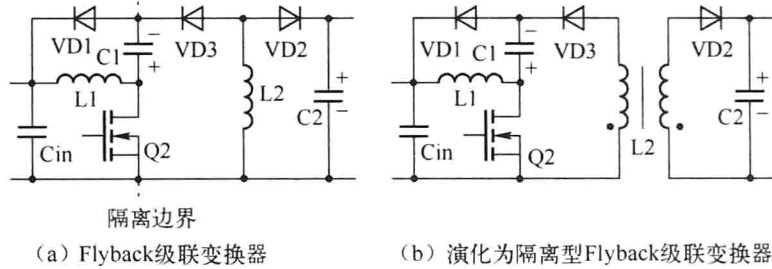


图 1.14 Flyback 级联变换器的隔离演化

Flyback 级联变换器的隔离边界应设在第二级变换的电感，思路与 Flyback 变换器的隔离型演化相同，将电感分解为在同一磁路的两个耦合电感，如图 1.14 (b) 所示。隔离型 Flyback 级联的具体设计详见本书第 4 章第 5 节“极宽输入电压范围的开关稳压电源”。