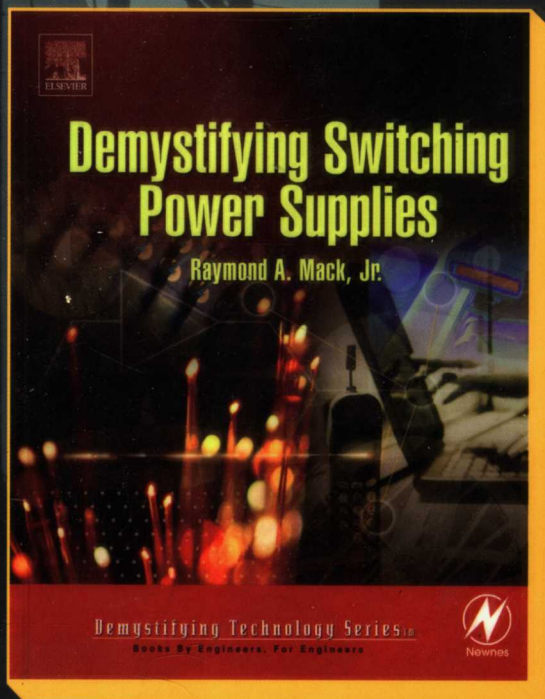


# 开关电源入门

## Demystifying Switching Power Supplies

[美] Raymond A. Mack, Jr. 著  
谢运祥 等译



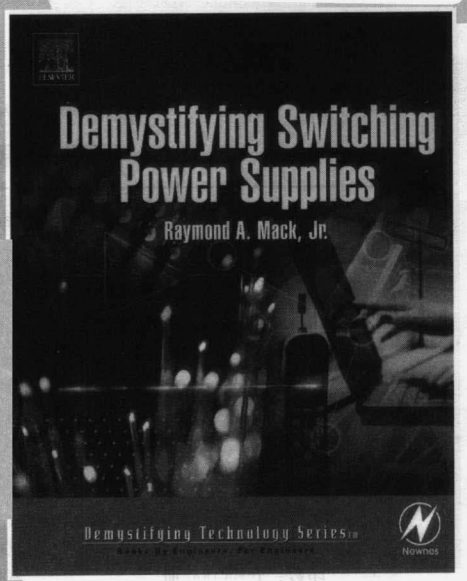
TURING

图灵电子与电气工程丛书

# 开关电源入门

## Demystifying Switching Power Supplies

[美] Raymond A. Mack, Jr. 著  
谢运祥 等译



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

开关电源入门/(美)马克(Mack, R. A.)著; 谢运祥等译.

—北京: 人民邮电出版社, 2007. 9

(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-16422-3

I. 开... II. ①马... ②谢... III. 开关电源 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 090583 号

### 内 容 提 要

本书以开关电源实用设计为主线,介绍了常用开关电源的主电路和控制电路,并讨论了主电路元器件的参数计算与选择,然后通过应用实例对开关电源的设计和分析进行了剖析。书中主要内容包括:基本开关电路、控制电路、电源输入级、非隔离电路、变压器隔离型变换器、无源器件的选择、半导体的选择、电感的选择、变压器的选择、正弦波逆变器的设计举例、PC 离线式电源等。

本书结构合理,层次分明,内容深入浅出,通俗易懂。本书适用于开关电源初学者和开关电源从业者,也适合电气工程及其自动化专业、自动化专业以及其他相关专业本科生阅读,还可作为相关专业的工程技术人员与维修人员的参考用书。

图灵电子与电气工程丛书

### 开关电源入门

- 
- ◆ 著 [美] Raymond A. Mack, Jr.  
译 谢运祥 等  
责任编辑 舒 立
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京铭成印刷有限公司印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张: 13.5  
字数: 280 千字 2007 年 9 月第 1 版  
印数: 1—5 000 册 2007 年 9 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2006-2493 号

ISBN 978-7-115-16422-3/TN

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

# 版 权 声 明

*Demystifying Switching Power Supplies*, by Raymond A. Mack, ISBN 0-7506-7445-8. Copyright © 2005 by Elsevier. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN 981-259-675-5

Copyright © 2005 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授权人民邮电出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)出版发行。

此版本仅限于在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律制裁。

# 译者序

与传统的线性电源相比,开关电源具有效率高、功率密度高、电压调整率高、体积小、重量轻等诸多优势,因而得到广泛应用。特别是20世纪90年代以来,微型计算机的普及与通信行业的迅猛发展,推动了开关电源技术的进步和开关电源产业的迅速发展。当前,世界电源产业迅速向中国转移,使得中国成为世界上最大的电源生产基地,国内从事电源产品研究和开发的企业迅速发展,从业人员迅猛增长。然而,由于电源产品的品种规格众多,并具有一定的针对性,即使是国际著名的电源制造商,其市场占有率也不高,这就为国内不同层次的中小电源制造企业提供了生存和发展空间。因此,大力推广和普及开关电源实用技术,以提高国内电源产品设计水平,具有重要意义。

开关电源技术涉及电子技术、自动控制理论、磁性元件和半导体功率器件等,是一个多学科交叉且应用性强的技术。对于开关电源初学者来说,如果没有一本好的教材,要想迅速掌握开关电源的设计技巧和精髓实属不易。本书以开关电源实用设计为主线,在介绍常用开关电源的主电路和控制电路的基础上,讨论主电路元器件的参数计算与选择,最后通过应用实例对开关电源的设计和分析进行了剖析,从而将开关电源的基本理论、控制方法、设计技巧、元器件的选择等内容有机地结合起来,易于开关电源初学者和开关电源从业人员较全面而系统地学习和理解开关电源技术。本书也为工程师们提供了快速解决工程中选择合适的电源的方法(包括如何使用离线式电源和电源模块,并提供开关电源的基本设计方法)。

本书突出了开关电源的设计艺术,尽量避免应用数学工具,使读者能够快速理解开关电源原理与设计要点。此外,还特别给出元器件(如电感和变压器)的选择方法,以确保电源工作的安全性和可靠性。最后,本书强调开关电源设计中必须考虑各种参数与性能之间的平衡,并结合作者在工作中所积累的经验,通过设计实例阐述了这一点。这部分内容具有较高的参考价值。书中所有设计实例均结合实际模拟芯片的典型应用,同时通过介绍开关电源的设计步骤和设计方法,给出了很多实用、有效的设计公式。

本书主要由华南理工大学的谢运祥翻译,华南理工大学电力电子与电力传动专业的硕士研究生胡焱申、宋静娴、邓勇、邓衍平、张祖正、张常玉、魏晨、陈果和李琳琳等也参与了本书的翻译工作。华南理工大学的丘东元对译稿进行了认真的审核,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,书中难免存在疏漏,望广大读者和同行批评指正。

译者

2007年3月

# 前 言

本书面向需要了解开关电源工作原理的读者。通过本书的学习,读者可以从电源制造商提供的资料中选择合适的器件进行特定的离线式电源的设计,也可以学会设计直流—直流变换器。针对没学过模拟电路的读者,本书介绍了模拟电路设计的基础知识。在此之上,本书讲解了如何设计和分析实用开关电源。有较强的模拟电路知识背景的读者可以略过前面的基础知识部分。

本书省略了很多公式的推导和变换过程。这些变换过程作为课后练习留给读者。

电源主要分为两种:线性电源和开关电源。线性电源采用连续时间控制;开关电源是利用方波控制输出的时间采样系统。本书将对多种类型的开关电源进行介绍。

## 致 谢

同其他书一样,本书借鉴了很多他人的成果。在此,特别感谢 Motorola 公司的应用教程 *Linear/Switchmode Voltage Regulator Handbook* 的作者、IR 公司的 *HDB-3 Power MOSFET HEXFET Databook* 的作者和飞利浦公司的半导体应用教程 *Switch Mode Power Supply*(一本很好的书,但只在它们的网站上可以看到)的作者。

感谢 Linear Technology 公司的鼎力支持。该公司提供了他们原本仅供其客户使用、但最终对所有想应用它的人免费的开关电源研发软件 SwitcherCAD III,本书大部分的电路图最初都是应用该软件生成的。

# 绪 论

开关电源的原理已经应用了 100 多年(虽然早年人们并没有意识到)。汽油发动机中的点火系统是最早的一种反激开关电源,之后开关电源广泛应用于电视机高压部分,这也是一种基本的反激电源。“反激”的叫法就源于电视机 CRT 中的射线从电视机屏幕右边回到左边的短暂过程(即回扫过程<sup>1</sup>)。偏转线圈中电流的快速变化产生了很大的电压,这在电视中用于产生 CRT 所需的高加速电势。

直至 20 世纪 60 年代末,开关电源的三大主要元件(磁性元件、开关器件和整流器)的发展改变了开关电源仅应用于电视机高压部分的局面,开关电源开始广泛应用。在 20 世纪 60 年代早期,最先应用于开关电源的电子元件是双极晶体管,但是对于低功率场合来说其价格过于昂贵,直到半导体价格变得合理后,这一情况才有所改观。从 1970 年开始,各种类型元件的发展改变了开关电源市场的格局,三端线性调整器促进了线性稳压电源的发展。半导体器件的发展促使几瓦容量的单个开关电源开始出现,这些电源利用集成芯片、一个电感和一对电容组成了一个完整的电压调整器,其体积小于 20 世纪 60 年代的一个 TO-3 的晶体管的体积。

对于交流输入电源来说,其单位功率的价格已经变得很低,除非大批量生产,否则自行设计和制造这种电源是不经济的。因此,很多公司开始销售系列的标准输出电压电源,其中大多数公司也基于标准设计提供非标准输出电压的电源,只象征性地收取少量设计费用。

很多主要的线性芯片制造商(如 Linear Technology、Maxim、TI、National Semiconductor、Analog Devices 等)提供了一系列适用于现场电压调整或变换的开关调节电路,这些制造商生产的现代器件体积小、效率高。这对使用蓄电池作为电源的设备来说尤其重要。现代器件通常将控制电路、开关器件以及所需的整流器集成在同一封装内。

无源元件也得到了迅猛发展。磁性材料公司(如 Ferroxcube、Siemens、Micrometals、Spang 公司的磁技术部门等)将变压器和扼流圈的工作频率从 20 世纪 60 年代的 10kHz~50kHz 提升到现在的 1MHz 以上。因而滤波电容和磁心的体积得以大大减小,同时电容生产商也大大提高了开关中使用的滤波电容的品质。普通电解电容的等效串联电阻(ESR)很大,输入直流电压快速变化时,会引起很大的功率损耗。如果等效交流电流过高,电解电容会因过热而击穿。因此,现在所有电解电容生产商都尽量减

---

1 回扫与反激的英文都是 flyback。——编者注

小等效串联电阻。

## 线性电源和开关电源的比较

下面对线性电源和开关电源的性能进行对比,通过对比可知开关电源广泛应用的原因。

线性电源只能输出比输入电压低的电压,所有的线性电源都要求输入电压比输出电压高出最小压差,这个压差称为跌落(drop-out)电压,该参数决定了线性电源的效率及最大功率损耗。

以一个电压为 6.0V、最大电流为 2A 的线性电源为例。线性调整器的跌落电压一般为 2V。如果选用铅酸蓄电池,当每个蓄电池两端电压降至 1.9V 左右时,蓄电池将开始放电。电路的正常工作至少需要 8V 的电压(负载 6V,加上 2V 的跌落电压),所以至少需要 5 个蓄电池。此时电路的最小输入电压为 9.9V(蓄电池放电时),负载功率为 12W,负载电流为 2A。蓄电池放电时线性调整器会消耗 7.8W,因而线性调整器的效率为 60%。单个蓄电池充满电时,电压为 2.26V,5 个蓄电池提供的电压为 11.3V。负载功率仍然为 12W。此时线性调整器消耗功率为 10.6W,效率为 53%。

如果每个蓄电池提供的能量降低一些,电路的效率会有所提高。如果蓄电池不在 2V 的电压下工作,就可以达到提高电路效率、降低成本的目的(代价是蓄电池充、放电循环次数的增加)。如果采用 4 个蓄电池,线性调整器在充电结束时消耗 4W 的功率,电路效率为 75%。电池充满电时电路效率仅提高到 67%。

在第一个例子中,5 个蓄电池中有 2 个蓄电池的能量全部产生热量而损耗掉了。在第二个例子中,4 个蓄电池中有 1 个产生的能量全部发热而损耗掉。因此,由蓄电池提供恒定电压的线性调整器成本相当昂贵。

上述例子也可用一个结构简单的开关电源实现。开关器件采用 FET,其导通电阻仅为  $0.008\Omega$ 。换流二极管可以采用肖特基二极管,其导通压降仅为 0.5V。初步估计,开关管上消耗的最大功率为 0.032W,二极管上消耗的功率为 1.0W。蓄电池充满电时,电路的效率为 92%;放电时,效率接近 99%。更重要的是,无论是 4 个蓄电池供电,还是 6 个或者 12 个蓄电池供电,电路的效率几乎保持不变。

与线性电源相比,开关电源还有另一个优点。对于线性电源,至少需要 4 个蓄电池才能保证正常运行。而对于开关电源来说,1~3 个蓄电池就可以满足要求,而且其效率比线性电源的高。

这种情况对线性工作的电源也一样。变压器是线性电源必不可少的元件。输出功率为 1000W 的线性电源,其变压器的重量约为 100pound(1pound=453.59g)(如果要求工作在 50Hz 和 60Hz 两种频率下会更加笨重),所需的半导体元件需要大量的散热片而散热片也需大量的风扇,其体积大于  $1\text{ft}^3$ ( $1\text{ft}=0.30\text{m}$ )。如果输入电压为 110V 和 220V,线性电源需要手控或者复杂的电子开关在两种电压之间切换。相比之下,能



够工作在 110V 和 220V 两种输入电压、50Hz 和 60Hz 两种频率下的开关电源的电路不需要电子切换开关,重量不超过 50pound,体积仅是线性电源的 1/4。此外,开关电源的成本也远小于线性电源的成本。

开关电源也有其自身的缺点,比如输出包含高频噪声,线性电源比开关电源安静 100~1000 倍。在易受噪声干扰的模拟电路中,线性电源是最佳之选。为了获得最大效率,如今的电源系统大部分首先用开关电源将电压调制到刚刚高于跌落电压,然后再用线性电源为模拟电路供电。开关电源的另一个缺点是,如果负载电流或者输入电压突然有一个较大的变化,其恢复时间要长于线性电源的恢复时间。

线性电源适用于较小功率场合。在上述例子中,我们假设开关管的功率损耗为  $I^2R$ ,更详细的分析中还要包含开关管在导通和关断过程中的损耗和驱动开关管所需要的功率。此外,仍然存在适用于小功率场合的具有很低跌落电压的专用线性调整器。基于这两种原因,线性调整器在某些低功率场合应用较多。

# 目 录

<b>第 1 章 基本开关电路</b> .....	1	3.5 浪涌电流 .....	39
1.1 储能基本原理 .....	1	3.6 保持时间 .....	40
1.2 Buck 变换器 .....	2	3.7 输入整流 .....	42
1.3 Boost 变换器 .....	3	3.8 输入储能电容特性 .....	42
1.4 反相 Boost 变换器 .....	5	<b>第 4 章 非隔离电路</b> .....	44
1.5 Buck-Boost 变换器 .....	6	4.1 通用设计方法 .....	44
1.6 变压器隔离型变换器 .....	6	4.2 Buck 变换器设计 .....	45
1.7 同步整流 .....	9	4.3 Boost 变换器设计 .....	51
1.8 电荷泵 .....	10	4.4 反相变换器设计 .....	57
<b>第 2 章 控制电路</b> .....	12	4.5 升/降压电路设计 .....	58
2.1 基本控制电路 .....	12	4.6 电荷泵设计 .....	62
2.2 误差放大器 .....	14	4.7 布线 .....	65
2.3 误差放大器的补偿 .....	15	<b>第 5 章 变压器隔离型变换器</b> .....	67
2.4 测试次序 .....	18	5.1 反馈原理 .....	67
2.5 典型的电压模式 PWM 控制器 .....	18	5.2 反激电路 .....	73
2.6 电流模式控制 .....	23	5.3 实用反激电路设计 .....	77
2.7 典型的电流模式 PWM 控制器 .....	24	5.4 离线式反激电路设计范例 .....	78
2.8 电荷泵电路 .....	27	5.5 非隔离式反激电路设计 范例 .....	83
2.9 多相 PWM 控制器 .....	30	5.6 正激电路 .....	86
2.10 谐振模式控制器 .....	30	5.7 实用正激变换器设计 .....	87
<b>第 3 章 电源输入级</b> .....	31	5.8 离线式正激变换器设计 范例 .....	87
3.1 离线运行 .....	31	5.9 非隔离式正激变换器设计 范例 .....	91
3.2 射频干扰抑制 .....	32	5.10 推挽电路 .....	94
3.3 安规事项 .....	35	5.11 实用推挽电路设计 .....	95
3.4 功率因数校正 .....	36	5.12 半桥电路 .....	98

5.13 实用半桥电路设计 .....	100	8.2 磁心的特性 .....	149
5.14 全桥电路 .....	102	8.3 环形扼流圈中磁粉心的 设计 .....	158
<b>第 6 章 无源器件的选择 .....</b>	<b>105</b>	8.4 Boost 变换器中磁心的选择 ..	160
6.1 电容的特性 .....	105	<b>第 9 章 变压器的选择 .....</b>	<b>163</b>
6.2 铝电解电容 .....	106	9.1 变压器的特性 .....	163
6.3 固体钽电容和铌电容 .....	108	9.2 安全问题 .....	165
6.4 固体聚合物电解电容 .....	109	9.3 实际制作的考虑 .....	166
6.5 多层陶瓷电容 .....	109	9.4 正激变压器磁心的选择 .....	168
6.6 薄膜电容 .....	112	9.5 反激磁心的实际考虑 .....	169
6.7 电阻的特性 .....	113	9.6 反激“变压器”磁心的选择 .....	169
6.8 碳膜电阻 .....	113	<b>第 10 章 正弦波逆变器的设计</b>	
6.9 薄膜电阻 .....	114	<b>举例 .....</b>	<b>172</b>
6.10 绕线电阻 .....	114	10.1 设计要求 .....	172
<b>第 7 章 半导体的选择 .....</b>	<b>116</b>	10.2 设计描述 .....	172
7.1 二极管的特性 .....	116	10.3 前置调节器的详细设计 .....	177
7.2 结型二极管 .....	116	10.4 输出变换器详细设计 .....	180
7.3 肖特基二极管 .....	119	10.5 H 桥的详细设计 .....	182
7.4 净化 .....	120	10.6 桥驱动的详细设计 .....	183
7.5 双极型晶体管 .....	121	<b>第 11 章 PC 离线式电源 .....</b>	<b>187</b>
7.6 功率场效应晶体管 .....	125	11.1 规格要求 .....	187
7.7 栅极驱动 .....	128	11.2 电源的输入部分 .....	188
7.8 安全工作区和雪崩击穿额 定值 .....	135	11.3 直流—直流变换器 .....	190
7.9 同步整流 .....	138	11.4 二极管的选择 .....	192
7.10 电流检测功率 MOS 场效 应管 .....	141	11.5 电感设计 .....	193
7.11 封装的选择 .....	141	11.6 电容设计 .....	196
7.12 绝缘栅双极型晶体管 .....	144	11.7 变压器设计 .....	197
<b>第 8 章 电感的选择 .....</b>	<b>147</b>	<b>索引 .....</b>	<b>199</b>
8.1 实际电感的特性 .....	147		

# 第 1 章 基本开关电路

本章介绍理想电感和电容的时域分析,并回顾几种理想开关电源。此外,后续章节将介绍电感和电容的磁特性、电气特性和寄生参数特性,并介绍其对独立元件设计的影响。

## 1.1 储能基本原理

式(1-1)定义了电感<sup>1</sup>。如果 1A/s 的电流变化在电感中产生 1V 的压降,那么该电感为 1H。

$$V=Ldi/dt \quad (1-1)$$

这是楞次定律。由此可以看出电感中的电流不能发生突变。如果电流发生突变,电感上的电压将为无穷大。实际状况下,开关触头上的电弧等将使得其上的电压非常高,但不是无穷大。此外还可以看出,当电感从储能状态( $di/dt$  为正)转为释放能量状态( $di/dt$  为负)时,其上的电压即刻从正向转为反向。式(1-2)是式(1-1)的另一种表达方式,当电压已知时,可由该式计算出电感中的电流。

$$I=1/L \int Vdt + I_{\text{initial}} \quad (1-2)$$

式(1-3)定义了电容。它表明如果 1C 的电量在电容上产生 1V 的电压,那么该电容为 1F。

$$Q=CV \quad (1-3)$$

3

式(1-4)和式(1-5)描述了电容和电压、电流之间的关系(充电能量是电流的积分,电流为 $dq/dt$ )。

$$V=1/C \int idt + V_{\text{initial}} \quad (1-4)$$

$$I=Cdv/dt \quad (1-5)$$

开关电源中滤波电容的电流一般为锯齿波,滤波电容的目的是限制电压变化(即限制电压纹波)。式(1-4)中有两个变量可以控制输出电压的变化。我们可以通过加大电容或者减小  $dt$  控制电压纹波。开关电源的一大优点就是  $dt$  值可以相当小(即高转换频率),故电容可以选取很小的值。

1 本书中图形和文字符号沿用原书的表示法,与国内标准不尽相同,请读者注意。如电压量用符号  $V$  表示。——编者注

## 1.2 Buck 变换器

图 1-1 所示为理想 Buck 变换器,其组成元件为:电压源、压控开关、二极管、电感、电容和负载电阻,这些元件均为理想元件。之所以称作 Buck 变换器,是因为电感上的电压是“降低的”,或者和输入电压反相<sup>1</sup>。Buck 变换器的输出电压一般低于输入电压。理想变换器的输入电压为 20V,负载为 10 Ω,负载电压为 5V,开关周期为 10 μs。开关产生脉宽调制波形供给无源元件,变换器处于稳态时,其输出电压为<sup>2</sup>:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \cdot DC \quad (1-6)$$

由上式可以看出,电感电流处于连续模式时,输出电压和电感、负载电流、输出电容无关。该式假设电感电压为方波。

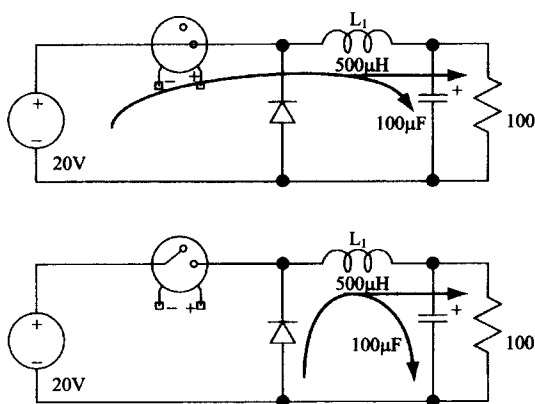


图 1-1 理想的 Buck 变换器原理图<sup>3</sup>

变换器中的二极管作为压控开关,在开关管关断时为电感放电提供回路:电感充电时,二极管由于被反向偏置而没有电流流过;开关管关断时,电感电流流过二极管。

4

为了实现电源的简化设计,可假设充电期间施加在电感上的电压为标准方波。设计实例中电源的输出电压纹波为 20mV。方波是一种很好的近似,因为电感电压在充电状态时变化率为 0.02/15 即 0.13%;在放电状态时为 0.02/5 即 0.4%。方波的恒定电压使得式(1-1)中的  $di/dt$  为恒定常量。

图 1-2 所示为系统处于稳态时的输出电压(下图)和电感电流(上图),此时负载电压为 5V,负载电流为 500mA。

1 英文 Buck 有“反”、“抵制”之义。——编者注

2 式中  $DC$  为占空比。——编者注

3 图中省略了电阻的单位  $\Omega$ ,全书同。——编者注

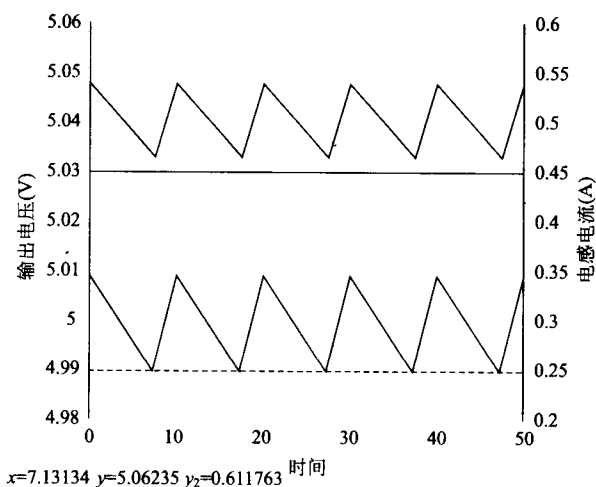


图 1-2 Buck 变换器输出电压及电感电流波形

需要注意的是,输出电流纹波与电感电流的直流分量相比很小。本例中,电流纹波峰值为 75mA。另一点需要注意的是,系统处于稳态时纹波电流与负载电流无关,这是由于稳态时电感电流受控于电感两端电压,充电速度和时间取决于电压差  $V_{in} - V_{out}$ 。平均电感电流等于输出电流。

Buck 变换器也可以工作在不连续模式,也即在开关期间电感电流已经降至零。

式(1-6)不适用于不连续模式。不连续模式下 Buck 变换器的输出电压纹波相对较高,这是因为在电感电流降至零期间,电容要给负载提供电流。通常,当负载电流远小于额定值时,Buck 变换器只能工作在不连续模式。

5

### 1.3 Boost 变换器

图 1-3 所示为理想 Boost 变换器,其组成为:电压源、开关、二极管、电感、电容和负载,除电容和负载外,其余均为理想元件。之所以叫做 Boost 变换器,是因为电感电压叠加到输入电压上,实现输出电压高于输入电压<sup>1</sup>。因而 Boost 变换器的输出电压通常高于输入电压。这个理想变换器的输入为 5V,负载为 1000Ω,输出为 20V。开关管关断时,二极管为电感电流提供回路;开关管导通时,二极管关断,开关周期为 10μs。

6

开关管导通时,开关管和电压源为电感充电。电感充电时,由于二极管反向截止,负载中的电流由电容提供。开关管关断时,电感中有电流流过,电感电流使得二极管正向导通,为负载供电。这时电感上的电压反向,叠加到输入电压上。稳态时,输出电压为:

1 英文 Boost 有“提升”之义。——编者注

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} / (1 - DC) \quad (1-7)$$

由上式可见, Boost 变换器在连续模式下, 其输出电压与电感、负载电流和输出电容无关。

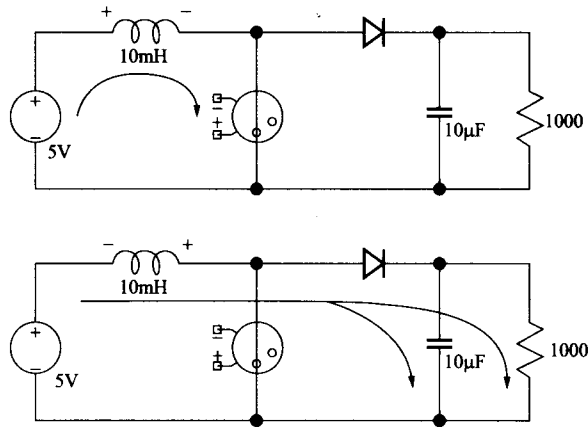


图 1-3 理想的 Boost 变换器

开关管导通时, 由于电容需要提供全部的负载电流, 因此 Boost 变换器中的电容大于 Buck 变换器中的电容。

图 1-4 所示为 Boost 变换器输出电压 20V、输出电流 20mA 时的输出电压波形(下图)和电感电流波形(上图)。与 Buck 变换器类似, 连续模式下电感中的纹波电流和输出电流无关, 通常峰值电感电流仅略高于平均电感电流。

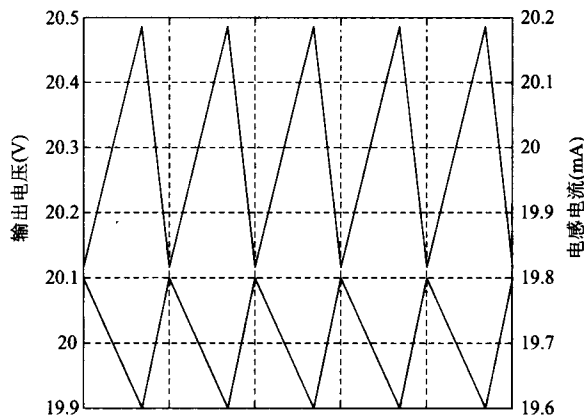


图 1-4 Boost 变换器输出电压及电感电流波形

Boost 变换器也可以工作在不连续模式。和 Buck 变换器一样,由于在电感电流为零时电容要提供给负载电流,不连续模式下其纹波电流也较大。Boost 变换器工作在不连续模式的另一个缺点是,开关管和电感中的峰值电流比较大。

给定输出电流,可以计算出两种工作模式下的输入电流。如图 1-3 所示的连续模式下,输入电流平均值为 80mA。式(1-8)给出了两种模式下的平均输入电流;式(1-9)给出了不连续模式下输入电流的峰值。

$$I_{in-avg} = I_{out-avg} \cdot \frac{1}{1-DC} \quad (1-8) \quad \boxed{8}$$

$$I_{in-peak} = 2 \times I_{out-avg} \cdot \frac{1-V_{out}/V_{in}}{DC} \quad (1-9)$$

如果本例中开关管的占空比为 0.25(不连续模式)而不是 0.75(连续模式),那么开关管和电感的峰值电流将为 480mA 而不是 81.75mA。

## 1.4 反相 Boost 变换器

图 1-5 所示为理想反相 Boost 变换器。开关管导通时,电压源为电感充电。电感充电时,二极管反向截止,因而负载电流由电容提供。开关管关断时,电感电流继续流通,但是此时电感电流使得二极管正向导通,为负载提供电流。电感的一端与公共端相连,因而开关管关断时的电流使输出电压反向。

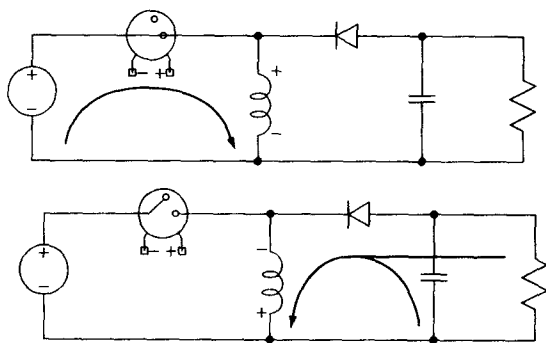


图 1-5 理想的反相 Boost 变换器

变换器处于稳态时,连续模式下输出电压如式(1-10)所示。和前述正向 Boost 变换器一样,输出电压的幅值大于或等于输入电压。

$$V_{out} = -V_{in} \cdot \frac{DC}{1-DC} \quad (1-10)$$



## 1.5 Buck-Boost 变换器

如图 1-6 所示,如果在 Boost 变换器中加入一个开关管和一个二极管,就构成了 Buck-Boost 变换器,其输出为高于或低于输入电压的正向电压。电路中两个开关管同时导通和关断。与 Boost 变换器类似,开关管导通时电感充电;开关管关断时能量传输给负载。二极管  $D_1$  将电感的一端和公共端相连,故电感上的电压可以高于或低于输入电压。

10

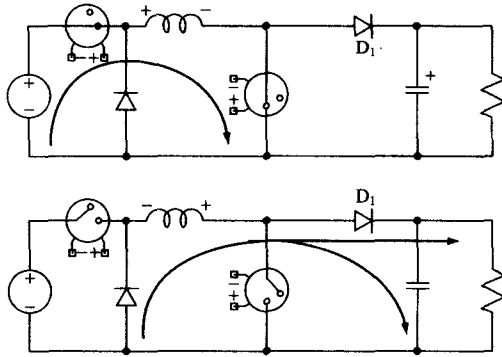


图 1-6 理想的 Buck-Boost 变换器

## 1.6 变压器隔离型变换器

开关电源直接连接交流电源(离线式电源)时,需要变压器以隔离负载和交流电源。此外变压器还可用于其他需要隔离(如医疗器材的隔离)的电源中。表 1-1 列出了不同变换器适用的功率范围和复杂程度。这些变换器也可应用于所列功率范围之外的场合,但是效率会受到影响。

表 1-1

电 路	功率等级	复杂程度
反激	1~100W	低
正激	1~200W	中
推挽	200~500W	中
半桥	200~500W	高
全桥	500~2000W	很高

离线式电源实际上是一个给变压器隔离直流—直流变换器供电的直流电源。本节接下来将介绍直流—直流变换器电路,第 3 章将着重介绍输入为直流的开关电源。