



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

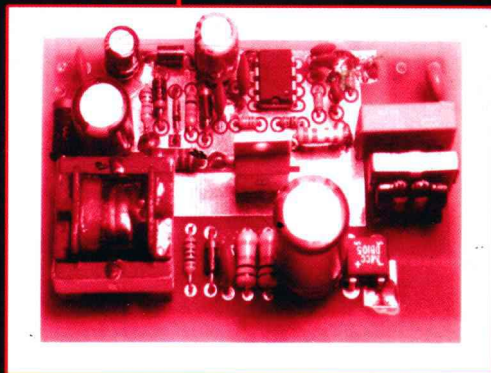
开关功率变换器 ——开关电源的原理、 仿真和设计 原书第2版

**Power-Switching Converters
(Second Edition)**

(美) SIMON ANG 著
ALEJANDRO OLIVA
徐德鸿 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

开关功率变换器

——开关电源的原理、仿真和设计

(原书第2版)

(美) SIMON ANG 著
ALEJANDRO OLIVA

徐德鸿 陈 敏 陈 怡
伍晓峰 林 平 张艳军 译

机械工业出版社

本书除介绍基本开关变换器的拓扑之外,还介绍了开关变换器控制策略、开关变换器的闭环控制和稳定性设计方法;开关变换器的仿真工具,包括开关变换器的 PSpice 和 MATLAB 仿真方法;交错并联变换器和开关电容变换器等内容。本书中的开关变换器设计案例很有特色,可以系统地培养读者综合各部分知识的运用能力。

本书可以作为电气工程技术人员系统学习开关电源技术知识的参考书。

Power-Switching Converters Second Edition/by Simon Ang, Alejandro Oliva/ISBN: 0-8247-2245-0

Copyright © 2005 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版,限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

版权所有,侵权必究。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2006-6507 号

图书在版编目 (CIP) 数据

开关功率变换器:开关电源的原理、仿真和设计原书第 2 版/(美) 安格 (Ang, S.), (美) 奥利弗 (Oliva, A.) 著,徐德鸿等译. —北京:机械工业出版社,2010.8

(国际电气工程先进技术译丛)

Power-switching converters second edition

ISBN 978-7-111-30970-3

I. ①开… II. ①安…②奥…③徐… III. ①开关电源-功率变换器
IV. ①TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 109783 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:牛新国 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 24.5 印张 · 440 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-30970-3

定价:98.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

在 IT 和通信产业需求的推动下，开关变换技术和产业发展迅速，开关电源是电力电子技术应用的一个重要分支，越来越多的人从事开关变换技术和开关电源的研究、设计、制造。在这样的背景下，Simon Ang 博士在美国阿肯色州大学为高年级的大学生和研究生开设了“开关变换器”课程，配合课程撰写了本书，作为电气工程高级课程的教科书。

近 10 年来，我国电力电子技术和相关产业发展迅速，对相关人才的需求日益增加，许多大学陆续开设了电力电子技术及其专题的课程。其中，开关电源是一个典型的专题，但关于开关变换技术的系统教材还不多见。他山之石可以攻玉，基于上述观点，我们翻译了本书，希望本书的中文版具有一定的借鉴作用。

本书除介绍基本开关变换器的拓扑之外，还介绍了开关变换器控制策略、开关变换器的闭环控制和稳定性设计方法；开关变换器的仿真工具，包括开关变换器的 PSpice 和 MATLAB 仿真方法；交错并联变换器和开关电容变换器等内容。

本书中的开关变换器设计案例很有特色，可以系统地培养读者综合各部分知识的运用能力。本书可以作为电气工程技术人员系统学习开关电源技术知识的参考书。

由于译者水平有限，翻译过程中难免有理解不准确和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

译 者

前 言

在本书第2版中, Simon Ang 博士感谢合作者——阿根廷 Universidad Nacional del Sur 的 Alejandro Oliva 博士。在这个版本中, 加入了许多新的材料和参考文献, 有几个章节进行了彻底的修订。书中新加入了交错并联变换器和开关电容变换器这两章, 在开关变换器的动态分析中加入了离散建模方法, 并在设计实例研究中采用了新的例子。

本书可作为电气工程师高级课程电力电子变换器的教科书, 在第1~4章中介绍了基本开关变换器的拓扑, 第5章中介绍了开关变换器的基本控制策略。教师可以选择略过第7章交错并联变换器和第8章开关电容变换器的内容来教学。

第6章介绍开关变换器的闭环控制和稳定性设计方法, 讨论了基于状态空间平均模型和线性化的开关变换器动态特性分析。本章分成两个部分: 第1部分为连续模型和控制策略; 第2部分介绍基于数字采样的断续模型。这一章中的许多专题在授课时可以略过, 这些专题可在更高级的课程中介绍。

第9章提供开关变换器的仿真工具, 主要介绍开关变换器的 PSpice 和 MATLAB 仿真方法。这一章可在第2章和第4~6章结束时进行穿插教学。开关变换器的学习需要经历变换器的分析、设计、实验过程。第10章有完整的设计实例, 可以作为科技训练项目的参考。

附加的信息和材料, 会周期性地更新, 读者可以从网址 <http://www.crcpress.com> 下载。其中包括课件、PSpice 例子、MATLAB 源文件。PSpice 例子可以在 OrCAD 10.0 演示软件中运行。

还有其他一些人对本书第2版提供了帮助, 给出了建议和意见。我们感谢 Juan Carlos Balda 博士给予的详细的和建设性的意见, 使第6章内容的准确性得以提高。我们感谢 Roberto M. Schupbach 博士对 MATLAB 代码的错误检查。Graciela Rodríguez 放弃了她的假期, 对书中的插图和公式提供了无偿的帮助。第10章中的一些设计实例来自阿肯色州大学的毕业研究生参与的一些项目, 特别是 Kien Truong 和 Lan Phuong Bui Pham。感谢 Claudio Frate 为本书准备了大量插图。最后衷心感谢我们的家庭给予我们的爱和支持。

Simon S. Ang
Alejandro R. Oliva

目 录

译者序

前言

第 1 章 开关变换器简介	1
1.1 简介	1
1.2 工业发展趋势	1
1.3 线性变换器	2
1.3.1 串联式线性调整器	2
1.3.2 并联式线性调整器	4
1.4 开关变换器	5
1.4.1 带有阻性负载的基本开关变换器	5
1.4.2 带有阻感性负载的开关变换器	7
1.5 变换器稳态原理分析	9
1.5.1 电感伏秒平衡	9
1.5.2 电容电荷平衡	10
习题	10
参考文献	11
第 2 章 基本的开关变换电路	12
2.1 简介	12
2.2 Buck 变换器	12
2.2.1 连续模式	12
2.2.2 断续模式	16
2.3 同步整流	21
2.4 Boost 变换器	21
2.4.1 连续模式	22
2.4.2 断续模式	25
2.5 Buck-Boost 变换器	28
2.5.1 连续模式	29
2.5.2 断续模式	32
2.6 Cuk 变换器	35
2.7 非理想元器件实现的变换器	41
2.7.1 电感模型	41

2.7.2 半导体器件损耗	41
2.7.3 电容模型	42
习题	43
参考文献	44
第3章 谐振变换器	46
3.1 简介	46
3.2 并联谐振电路综述	47
3.3 串联谐振电路综述	48
3.4 准谐振开关的分类	49
3.5 零电流开关准谐振 Buck 变换器	51
3.6 零电流开关准谐振 Boost 变换器	57
3.7 零电压开关准谐振 Buck 变换器	62
3.8 零电压开关准谐振 Boost 变换器	66
3.9 串联负载谐振变换器	69
3.9.1 断续模式 ($0 < f_s < 0.5f_n$)	70
3.9.2 连续模式 ($f_s > f_n$ 或称为高于谐振频率模式)	72
3.9.3 连续模式 ($0.5f_n < f_s < f_n$ 或称为低于谐振频率模式)	74
3.10 并联负载谐振变换器	76
3.10.1 断续模式 ($0 < f_s < 0.5f_n$)	77
3.10.2 连续模式 ($f_s > f_n$ 或称为高于谐振频率模式)	80
3.10.3 连续模式 ($0.5f_n < f_s < f_n$ 或称为低于谐振频率模式)	81
习题	84
参考文献	86
第4章 隔离型变换器	87
4.1 简介	87
4.2 正激变换器	87
4.3 推挽变换器	92
4.4 半桥变换器	95
4.5 全桥变换器	96
4.6 反激变换器	98
4.7 零电流开关准谐振半桥变换器	102
习题	107
参考文献	107
第5章 开关变换器的控制策略	108
5.1 简介	108
5.2 脉宽调制	108

5.2.1 电压模式 PWM 策略	109
5.2.2 电流模式 PWM 策略	112
5.3 滞环控制: 开关电流源	116
5.3.1 t_{on} 时段稳态分析	117
5.4 商业化集成电路控制器	118
5.4.1 SG3524 固定频率电压模式控制器	118
5.4.2 TL497 变化频率电压模式控制器	121
5.4.3 UC3842 固定频率电流模式 PWM 控制器	122
5.4.4 TinySwitch-II 系列小功率离线开关管	124
5.5 谐振变换器控制策略	125
5.5.1 谐振变换器离线控制器	127
习题	130
参考文献	131
第 6 章 开关变换器的动态分析	133
6.1 简介	133
6.2 连续时间线性模型	134
6.2.1 经典控制技术分析开关变换器	134
6.2.2 开关变换器小信号模型概述	148
6.2.3 经典控制技术中的负反馈	152
6.2.4 考虑输出电容 ESR 的 Buck 变换器的反馈补偿	159
6.2.5 无输出电容 ESR 的 Buck 变换器的反馈补偿	162
6.2.6 有外部扰动的电压调整器线性模型	163
6.2.7 输出阻抗和稳定性	164
6.2.8 开关变换器的状态空间表示	165
6.2.9 状态空间平均	167
6.2.10 开关变换器传递函数	187
6.2.11 全状态反馈	194
6.2.12 输入 EMI 滤波器	199
6.3 离散时间模型	206
6.3.1 介绍	206
6.3.2 连续时域和离散时域	206
6.3.3 连续时间状态空间模型	207
6.3.4 开关变换器离散时间模型	208
6.3.5 全状态反馈离散控制系统设计	210
6.3.6 电压模式控制	211
6.3.7 电流模式控制	212

习题	215
参考文献	217
第 7 章 交错并联变换器	219
7.1 简介	219
7.2 交错并联 Buck 变换器	219
7.2.1 状态空间平均模式	221
7.3 交错并联 boost 变换器	222
7.3.1 状态空间平均模式	222
7.4 基于电流模式工作的交错并联变换器	226
7.4.1 纹波的计算	227
7.4.2 变换器的数量	229
7.5 功率因数校正	229
习题	231
参考文献	232
第 8 章 开关电容变换器	233
8.1 简介	233
8.2 单向功率传输 SCC	233
8.2.1 基本升压变换器	233
8.2.2 基本降压变换器	235
8.2.3 基本电压极性反向变换器	237
8.3 其他开关电容变换器拓扑	238
8.3.1 降压变换器	238
8.4 状态空间平均模型	240
8.4.1 升压变换器	241
8.4.2 n 阶降压 SCC	243
8.4.3 n 阶升压 SCC	243
8.5 双向功率传输 SCC	245
8.5.1 升降压变换器	245
8.5.2 罗氏变换器	247
8.6 谐振变换器	252
8.6.1 零电流开关 (ZCS)	252
8.7 开关电容功率变换器的损耗	255
习题	256
参考文献	256
第 9 章 开关变换器的仿真	258
9.1 简介	258

9.2 PSpice 电路描述	258
9.3 采用 “. CIR” 文本输入文件的 PSpice 仿真	259
9.3.1 理想的开环 Buck 变换器	259
9.3.2 含理想开关的 Buck 变换器	263
9.4 采用电路图输入的 PSpice 仿真	268
9.4.1 Boost 变换器	268
9.4.2 采用行为建模的 PSpice 仿真	270
9.4.3 ABM 模块的使用实例	275
9.4.4 采用控制模块的 PSpice 仿真	277
9.4.5 采用元器件供应商模型的 PSpice 仿真	280
9.5 开关变换器的小信号分析	282
9.5.1 开环传递函数	284
9.5.2 输入阻抗	286
9.5.3 输出阻抗	286
9.5.4 小信号瞬态分析	286
9.5.5 测量环路增益	289
9.5.6 频率补偿	289
9.6 创建可用于 PSpice 仿真的 Capture 符号	297
9.7 解决收敛问题	298
9.7.1 直流分析的出错信息	298
9.7.2 瞬态分析的出错信息	298
9.7.3 解决收敛问题的方法	298
9.7.4 (直流) 偏置点的收敛	299
9.7.5 检查电路拓扑和连接	299
9.7.6 瞬态收敛	300
9.8 使用 MATLAB 对开关变换器进行仿真	301
9.8.1 使用传递函数	301
9.8.2 使用矩阵	304
9.9 使用 Simulink 仿真开关变换器	306
9.9.1 用 Simulink 仿真传递函数的例子	306
9.9.2 用 Simulink 仿真状态空间矩阵的例子	307
习题	308
参考文献	309
第 10 章 开关变换器设计：案例学习	310
10.1 简介	310
10.2 电压型断续工作模式的 Buck 变换器设计	311
10.2.1 控制器设计	312

10.2.2	小信号模型	315
10.2.3	设计补偿网络和误差放大器	315
10.2.4	闭环 Buck 变换器	319
10.2.5	仿真结果	320
10.2.6	实验结果	322
10.3	电压型同步 Buck 变换器的数字控制	326
10.3.1	电路参数	327
10.3.2	闭环极点选择	327
10.3.3	离散时间模型	328
10.3.4	反馈增益	329
10.3.5	控制策略	330
10.3.6	用于 PSpice 仿真的模拟模型	331
10.3.7	仿真结果	332
10.3.8	与负载变化相关的闭环极点灵敏度	334
10.3.9	实验结果	334
10.4	电流型同步 Buck 变换器的数字控制	336
10.4.1	连续时间状态模型	336
10.4.2	推导离散时间模型	336
10.4.3	电流型控制不稳定的问题	337
10.4.4	跟踪调整器的扩展状态模型	337
10.4.5	反馈增益	338
10.4.6	控制策略	340
10.4.7	仿真结果	340
10.4.8	闭环极点对负载变化的敏感度	340
10.4.9	实验结果	342
10.4.10	DSP 编程	343
10.5	基于 UC3842 的反激变换器设计	349
10.5.1	设计规格	350
10.5.2	断续导通模式	350
10.5.3	初步计算	351
10.5.4	开环仿真	352
10.5.5	电流环	353
10.5.6	电压环	353
10.5.7	小信号模型	356
10.5.8	频率补偿	357
10.5.9	电磁干扰 (EMI) 滤波器的设计	359
10.5.10	印制电路板 (PCB) 设计	360
10.5.11	实验结果	362

10.6 基于 TopSwitch 的反激变换器设计	363
10.6.1 设计规格	364
10.6.2 初步计算	364
10.6.3 实验结果	365
10.7 基于 TinySwitch 的反激变换器设计	366
10.7.1 实验结果	367
10.8 开关音频放大器	368
10.8.1 案例学习	371
参考文献	378

第 1 章 开关变换器简介

1.1 简介

一个开关变换器或者工作于开关模式的功率变换器是一个电力电子系统，它是通过开关的开通或者关断，把一个等级的电压变换为负载端另一个等级的电压。开关变换器始于 1950 年，然而，由于功率晶体管的可靠性和成本问题使开关变换器最初只能应用于军事和航空领域。从 1970 年开始，随着现代功率器件的发展和应用，电源中越来越多地采用开关变换器。在 DC-DC 开关变换器电路中，半导体开关器件调节电源与负载之间的连接时间，控制功率从输入到输出负载的动态传输。开关变换器常被用于高效率电源和直流电动机驱动中。与线性电压变换器或线性电压调整器相比，开关电源具有较高的效率和较高的功率密度。新型功率半导体器件，如功率 MOSFET（金属氧化物半导体场效应晶体管）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、集成磁元件、新型拓扑和集控制与管理功能的超大规模集成 PWM 控制电路的发展使开关变换器的功率密度得到了很大的提高。

1.2 工业发展趋势

在过去的几年里，DC-DC 开关变换器技术经历了巨大的变化。许多集成电路和它们的辅助电路所需的供电电压从过去的 5V 电压标准降低到了小于 1.5V。同时，负载电流也增大到了几年前不可想象的程度。现在一些电子系统需要电源能够提供输出电压为 2.5V、电流为 60A，或输出电压为 1.8V、电流为 60A，或输出电压为 1V、电流为 100A。在不久的将来，预计一些微处理器的供电电压会降到 0.5V，电流会增大到 400A。通常对 DC-DC 开关变换器的动态要求为对从电流 75-100-75A 以 $100\text{A}/\mu\text{s}$ 变化的突变负载，要求变换器输出电压偏差小于 60mV。同时要求变换器在 $4\mu\text{s}$ 内恢复到输出电压的 $\pm 1.5\%$ 以内。这些要求使集中式电源传输低压大电流的能量变得非常困难。设计者现在逐渐转向分布式电源系统结构，用来满足现今复杂负载对低压大电流的需求。

分布式电源系统产生一个高压直流母线（比如 48V），并且分配较小的电流到不同的负载，在每个负载附近，有一个或者多个 DC-DC 开关变换器模块把母线电

压变换成负载所需的较低的电压源（比如 1V）。这些 DC-DC 开关变换器模块除了降压的功能外，还提供电气隔离和增加负载动态响应性能的功能。分布式电源系统消除了集中式电源系统由于需要厚铜母线而产生的机械结构和成本问题。其较低的输出电压导致较大的输出电流并且使电压调整率降低^[1]。

在 1999 年，测量得到变换器在 5V 时的高功率密度为 25W/in^3 [⊖]，到 2001 年，功率密度增加到在 3.3V 时的 40W/in^3 ，现今功率密度可达到高于 50W/in^3 ，而高功率密度被认为大约为 90W/in^3 。磁元件和无源元件集成的不断发展对增加功率密度而不牺牲性能起到了很大的作用^[2]。特别对低压变换器，同步整流实现了变换器效率和功率密度的较大提高。同步整流技术和交错并联技术的结合使商用变换器的效率能够达到高于 92%，而常规的变换器效率为 85%^[1]。

交错并联（或多重）变换器在单级功率变换器中有以下几个优点：输入、输出电容上的低电流纹波；负载变化时的快速动态响应；提高变换器的功率处理能力，使效率高于 90%。商业化的控制器可以使每相变换器工作在兆赫兹的频率范围，从而有效地降低变换器的尺寸^[3]。新一代开关变换器控制器是基于数字信号处理（DSP）技术实现数字控制、监控、通信功能于一个 DSP 芯片中，这样既简化了设计又显著减少了计数器数目。这种简化设计使得多重化的开关电源产品只需一个简单的控制结构，通过软件就可以实现每个电源的标准化。DSP 的计算辅助软开关技术（比如说 ZVS，即零电压开关，或 ZCS，即零电流开关），可用于提高变换器的效率。除此之外，很多高效率的拓扑通过利用高级非线性数字控制技术能使电源在全工作范围内都得到优化的性能^[4]。

1.3 线性变换器

线性变换器（又称电压调整器）有两种类型，分别为串联式调整器和并联式调整器，它们主要的区别在于输出电压的调节方式。

1.3.1 串联式线性调整器

串联式电压调整器如图 1.1 所示，它本质上是一个可变电阻，这个可变电阻是由一个工作于线性区的晶体管和负载串联组成。

直流输出电压通过采样电阻网络 R_1 和 R_2 后，和参考电压分别加到误差放大器的输入端进行比较。误差放大器的输出电压通过一个电流放大器来驱动串联型 NPN 晶体管的基极。电源的输出电压就是通过驱动串联型 NPN 晶体管的基极来进行调整的。当采样电阻 R_2 上的电压增加时，串联型 NPN 晶体管的基极驱动电流减小，使传送到输出端的电流减小，进而使输出电压降低。调整后的输出电压值 V_{out}

⊖ $1\text{in}^3 = 1.63871 \times 10^{-5}\text{m}^3$ 。

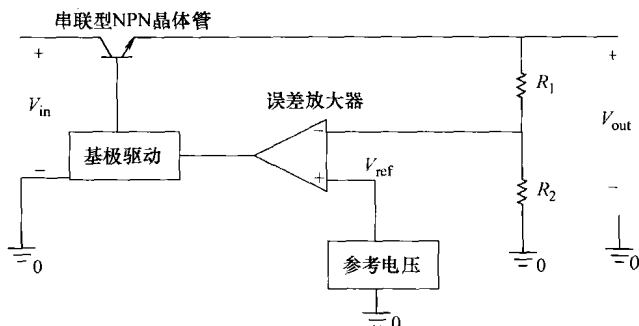


图 1.1 串联式电压调整器

可表示为

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1.1)$$

式 (1.1) 是假定串联晶体管是理想情况下的放大器工作电路的关系。输入电压的变化会导致串联晶体管的等效电阻 R_S 的变化。这个电阻 R_S 和负载电流 I_{load} 的乘积得到一个变化的电压差 V_{diff} ，用来补偿输入电压的变化，输出电压可以表示为

$$V_{out} = V_{in} - V_{diff} \quad (1.2)$$

和

$$V_{diff} = I_{load} R_S \quad (1.3)$$

或

$$V_{out} = V_{in} - I_{load} R_S \quad (1.4)$$

那么，对一个变化的输入电压来说，有

$$\Delta R_S = \frac{\Delta V_{in}}{I_{load}} \quad (1.5)$$

假定输出电压 V_{out} 和输入电压 V_{in} 是固定的，对一个变化的负载电流来说

$$\Delta R_S = \frac{-R_S \Delta I_{load}}{I_{load}} \quad (1.6)$$

输入电压的任何变化主要作用在串联晶体管上，输出电压的稳定性主要由反馈放大器的开环增益决定。一个串联式调整器可以实现一个简单的、低成本的输出电压源；然而，它只能提供一个比输入电压低的输出电压。即使这种线性调整器输入电压和输出电压之间一直有一端共地，但是通常需要在输入和输出之间加入直流隔离。这种串联式调整器的主要缺点是在大电流应用场合时串联晶体管上有过多的功耗，在串联晶体管的发射极和集电极之间的功耗可以由下式表示：

$$P_{diss} = (V_{in} - V_{out}) I_{load} \quad (1.7)$$

很明显,当输出电压一定时,功耗会随着输入电压的增加而增加。在不考虑输入和输出电压的波动时,这种线性调整器的效率可以表示为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{out}} I_{\text{load}}}{V_{\text{in}} I_{\text{load}}} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (1.8)$$

图 1.2 所示为输入电压和效率之间的关系 (5V 输出, 2.5V 跌落电压)。跌落电压指的是满足输出电压需要时,输入电压大于输出电压的最小幅值。低跌落电压 (0.5 ~ 1V) 的电源通常用串联型 PNP 晶体管设计。可以从图中看出,5V 输出电压的串联式调整器的最高效率大约是 67%,当输入电压增加时效率降低,当输入电压是 12V 时效率只有 42%。很明显效率会随着输出电压的增加而增加。

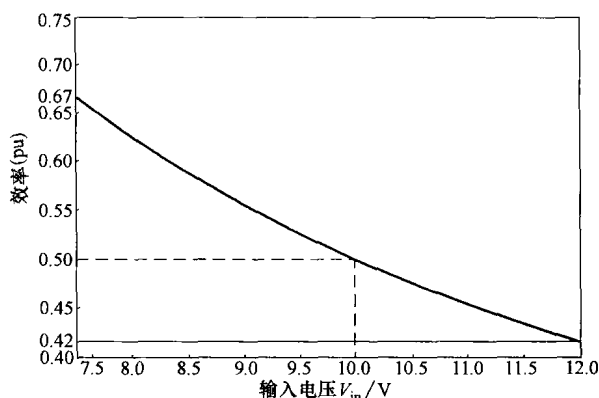


图 1.2 输入电压和效率之间的关系
(5V 输出, 2.5V 跌落电压)

1.3.2 并联式线性调整器

并联式调整器通过加入一个并联元件,使流过这个并联元件的电流随着输入电压和输出负载的变化而变化,基本的并联式电压调整器原理图如图 1.3 所示。

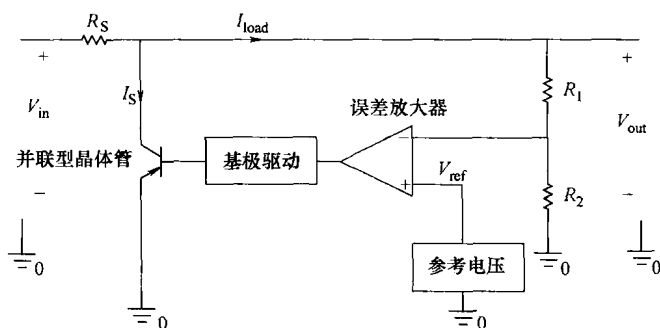


图 1.3 并联式电压调整器原理图

并联式电压调整器的输出电压可以表示为

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} - (I_{\text{load}} + I_S) R_S \quad (1.9)$$

式 (1.9) 中的 I_S 是并联支路的电流。这种并联式调整器对输入电压的瞬变响应不敏感,因此它不能反映负载电流瞬变到输入端的情况。这种并联式线性调整器

的效率可以表示为

$$\eta = \frac{V_{\text{out}} I_{\text{load}}}{V_{\text{in}} (I_{\text{load}} + I_{\text{S}})} = \frac{I_{\text{load}}}{I_{\text{load}} + I_{\text{S}}} - \frac{I_{\text{load}} R_{\text{S}}}{V_{\text{in}}} \quad (1.10)$$

从式 (1.10) 中可以看出, 由于有较大的功耗在电阻 R_{S} 上, 因此并联式调整器的效率会随着电阻 R_{S} 的增加而减小, 效率也会随着并联支路电流的增加而减小。通常来说, 并联式调整器的效率比串联式调整器的效率要低。

尽管线性电压调整器有很多缺点, 但是由于其成本低, 在商业上用得还是较多, 比如 UA7805CKC 串联式线性调整器 (1.5A, 5V)、TL431CP 并联式线性调整器。特别是在低功率应用场合, 性价比较高。然而当输出电流超过 5A 时, 线性调整器的功耗就变成了一个很大的问题。

1.4 开关变换器

一个简单的 DC-DC 变换器由两个半导体开关 (通常为一个开关晶体管和一个开关二极管)、一个电感以及一个电容组成, 如图 1.4 所示。这些半导体开关和储能元件的不同组合构成了开关变换器的不同拓扑。如果负载是直流电动机, DC-DC 变换器就是通常所说的斩波器或者是一个直流电动机驱动系统。理论上开关变换器的优点就是高效率和高功率密度, 可以使重量大大减小。然而, 开关变换器通常需要复杂的控制电路、噪声或 EMI (电磁干扰) 滤波器。在一些应用场合经常需要一个输入侧的滤波器。

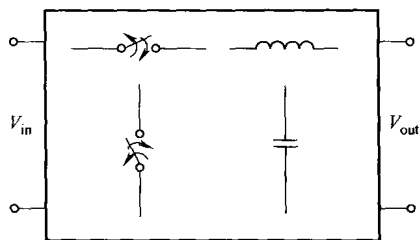


图 1.4 基本开关变换器单元

1.4.1 带有阻性负载的基本开关变换器

从图 1.5a 所示的简单开关电路可以理解开关变换器的基本概念。开关分别在 DT 时间内导通, 在 $(1-D)T$ 时间内关断。工作占空比 D 是开通时间 t_{on} 和开关周期 T 的比值。

$$D = \frac{t_{\text{on}}}{T} = t_{\text{on}} f_{\text{S}} \quad (1.11)$$

式中, f_{S} 是开关频率。

在阶段 DT 中, 负载和输入电源 V_{S} 相连; 然而在阶段 $(1-D)T$ 期间负载和输入电源是断开的; 所以最后加在负载电阻上的电压 $V_{\text{out}}(t)$ 是一个输入电源 V_{S} 的斩波电压, 如图 1.5b 所示, 平均输出电压 V_{a} 可以由下式表示: