



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



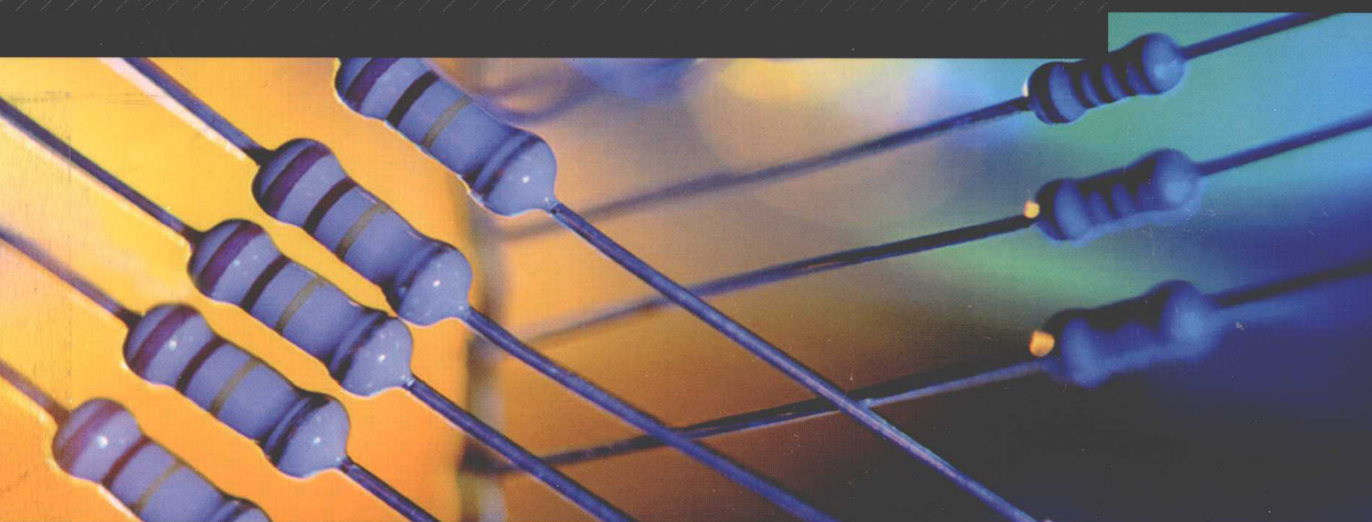
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Power Electronic

电力电子技术

林云 管春 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Power Electronic

电力电子技术

林云 管春 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电力电子技术 / 林云, 管春编著. -- 北京 : 人民
邮电出版社, 2012.6
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-27607-0

I. ①电… II. ①林… ②管… III. ①电力电子技术
—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第031038号

内 容 提 要

本书讲述了电力电子技术的基本理论与基本分析方法, 包括功率开关器件的原理、功率变换电路的原理、控制部分的原理和相关电路与系统的分析等。

本书的主要内容包括不可控、半控及全控的功率半导体器件原理及分析, PWM 开关变换器的拓扑结构, PWM 开关器件的稳态建模, 小信号建模, 控制器设计, 高频磁芯元件的分析与设计, PWM 开关芯片、软开关芯片的原理分析及软开关原理。

本书可以作为高等院校相关专业的学生教材, 也可以作为从事开关电源 UPS 等电力电子装置开发、设计工程技术人员参考用书。

21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

电力电子技术

-
- ◆ 编 著 林 云 管 春
责任编辑 刘 博
 - ◆ 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 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.5 2012 年 6 月第 1 版
字数: 438 千字 2012 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-27607-0

定价: 37.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

电力电子技术横跨电力、电子和控制领域，是现代电子技术的基础之一，已被广泛运用于工农业生产、国防、交通、能源和人民生活的各个领域，有着极其广泛的应用及发展前景，已经成为电气及相关专业的基础电子技术。

电力电子技术主要研究功率处理或功率变换，由功率半导体技术、微电子技术和控制技术实现。功率变换技术可分为4种：AC-DC变换、DC-DC变换、DC-AC变换、AC-AC变换。本书主要介绍开关稳压电源，即AC-DC与DC-DC部分，该部分是电力电子技术要研究的主要内容之一。

20世纪70年代起，为了降低电子设备的体积、重量，改善其动态特性，提高效率，人们研制成功了频率更高的晶闸管、大功率晶体管（GTR）以及功率场效应管。20世纪80年代出现了将MOS和GTR结合在一起的新型器件——IGBT。20世纪90年代以后，IGBT在中小容量的变换器中得到广泛的应用，几乎完全取代了GTR。20世纪末研制成的集成门极换流晶闸管结合了IGBT与GTO（可关断晶闸管）的优点，其在大功率系统的成功应用，对SCR和GTO是一个强有力的挑战。

传统的开关变换器的工作原理是频率调制式、脉宽调制式或两者结合的调制方式。电气设备的小型化，要求与之配套的开关电源体积更小、重量更轻、效率更高。要实现开关电源的小型化，除了集成化和采用新的封装技术外，更重要的是使变压器、滤波器小型化。为了减小开关过程中器件的损耗，在传统的脉宽或频率调制型变换器的基础上又开发了谐振型或准谐振型功率变换器。本书对单片开关电源芯片与谐振型变换器做了介绍。

本书内容除了器件部分（第4章、第10章）外，可分为稳态部分（第1章、第2章、第3章、第5章）、动态（小信号）部分（第7章、第8章）及磁路部分（第9章），第4章介绍了电力器件的原理，包括不可控的电力二极管、半控的晶闸管和各种全控自关断器件及其进展。第6章对电压模式控制芯片、电流模式控制芯片、单片开关电源芯片、软开关控制芯片的原理做了介绍。第1章、第2章、第3章、第5章主要介绍稳态DC-DC电路的分析方法及建模方法。第7章与第8章介绍了DC-DC动态分析与建模方法、控制器的设计。第9章介绍了磁路基本原理及其电感变压器的设计方法。第10章对软开关变换器做了介绍。本书涉及知识较广，综合了电路理论、磁路理论、控制理论以及电子技术等有关理论的基础内容。

本书的特点：注重建模分析模型，以便使读者能够看懂原理图，以及设计电源电路。同时，本书强调了小信号的分析与建模、控制器的设计等内容。在编写的过程中，编者力

图做到文字流畅、概念清晰，叙述深入浅出，利于读者阅读。

管春编写了本书的第 9 章及全书的习题部分，何丰编写了第 1 章、第 10 章。林云负责全书内容的确定和统稿工作，并编写了第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章与第 9 章。

由于编者水平有限，电力电子技术所涉及的内容较广，难以做到面面俱到，选材取舍难免不当，书中错误不妥之处亦在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论.....	1	第 4 章 电力电子器件.....	67
1.1 电力电子技术简介.....	1	4.1 电力电子器件概述.....	67
1.2 开关电源.....	6	4.1.1 简介.....	67
1.2.1 开关电源的分类.....	6	4.1.2 电力电子器件的发展.....	68
1.2.2 开关电源的发展.....	7	4.1.3 电力电子器件的分类.....	69
1.3 电力电子与相关学科的关系.....	10	4.2 功率二极管.....	69
第 2 章 稳态开关电路的分析		4.2.1 PN 结.....	69
与建模方法.....	11	4.2.2 PN 结的电容效应.....	70
2.1 变换器稳态分析法.....	11	4.2.3 PN 结的反向击穿.....	71
2.1.1 稳态分析法简介.....	11	4.3 功率二极管的结构及特性.....	71
2.1.2 电感伏秒平衡、电容电荷平衡		4.3.1 功率二极管稳态伏安特性.....	72
原则和小波纹近似法.....	13	4.3.2 功率二极管开关特性.....	73
2.1.3 Boost 变换器.....	18	4.3.3 功率二极管性能参数.....	74
2.1.4 Buck-Boost 变换器.....	21	4.3.4 功率二极管的分类.....	75
2.2 Cuk、Sepic 和 Zeta 变换器.....	23	4.4 晶闸管.....	76
2.2.1 Cuk 变换器.....	23	4.4.1 晶闸管的结构.....	76
2.2.2 Sepic 变换器.....	26	4.4.2 晶闸管的工作原理.....	77
2.2.3 Zeta 变换器.....	29	4.4.3 晶闸管的基本特性.....	78
2.3 6 种 DC-DC 开关变换器基本		4.4.4 晶闸管的主要参数.....	80
电路比较.....	31	4.5 晶闸管的派生器件.....	81
2.4 稳态等效电路模型.....	32	4.6 功率场效应管.....	84
2.4.1 直流变压器模型.....	32	4.6.1 基本结构与工作原理.....	84
2.4.2 电感铜损耗.....	34	4.6.2 多元集成结构.....	86
2.4.3 构建等效电路模型.....	36	4.6.3 MOSFET 的静态特性.....	86
2.5 如何对脉冲输入端建模.....	39	4.6.4 MDSFET 的动态特性.....	88
第 3 章 非连续导电模式的稳态分析.....	43	4.6.5 安全工作区.....	89
3.1 Buck 变换器非连续导电模式的		4.7 功率 MOSFET 新进展.....	91
临界条件.....	43	4.7.1 CoolMOS.....	91
3.2 Boost 变换器非连续导电模式的		4.7.2 低压低通态电阻 MOSFET.....	93
临界条件.....	50	4.8 大功率晶体管.....	94
3.3 Buck-Boost 变换器.....	55	4.8.1 结构.....	94
3.4 Cuk 变换器.....	58	4.8.2 工作特性.....	95
3.5 Zeta 变换器.....	60	4.8.3 GTR 的主要参数.....	96
3.6 Sepic 变换器.....	62	4.8.4 GTR 的二次击穿现象与	

安全工作区	97	6.6 单片开关电源	151
4.9 绝缘栅双极型晶体管	98	6.6.1 TOPSwitch-II 系列单片开关	
4.9.1 IGBT 基本结构	98	电源的性能特点	152
4.9.2 IGBT 与功率 MOSFET 的		6.6.2 TOPSwitch-II 系列单片开关	
比较	99	电源的工作原理	153
4.9.3 IGBT 的工作原理	99	6.6.3 TOPSwitch-FX 系列单片	
4.9.4 IGBT 的特性	101	开关电源	158
4.9.5 IGBT 的开关特性	102	6.6.4 Topswitch-GX 第四代单片	
4.9.6 IGBT 的安全工作区	103	开关电源	163
4.10 几种新型 IGBT 介绍	104	第 7 章 小信号开关电路的建模方法	164
4.10.1 IGBT 制造技术的发展历史	104	7.1 简介	164
4.10.2 穿通型 IGBT	105	7.2 基本的交流建模方法	166
4.10.3 非穿通型 IGBT 特性	105	7.2.1 对电感的波形求均值	167
4.10.4 逆阻型 IGBT	106	7.2.2 近似均值的讨论	167
4.10.5 沟槽终止型与场终止型		7.2.3 对电容电流参数的	
IGBT	106	波形求均值	168
4.11 其他新型电力电子器件概述	107	7.2.4 对输入电流求均值	169
第 5 章 开关电路	109	7.2.5 微扰和线性化	169
5.1 开关电路变换	109	7.2.6 小信号等效电路模型的	
5.1.1 交换源与负载	109	构成	171
5.1.2 开关电路的级联	110	7.2.7 关于微扰和线性化过程的	
5.1.3 三端单元的旋转	112	讨论	173
5.2 开关电路简单列举	114	7.2.8 基本变换器的小信号等效	
5.3 具有变压器隔离的变换电路	117	模型	174
5.3.1 全桥与半桥隔离式 Buck		7.2.9 非理想反激式的小信号等效	
电路	118	模型	175
5.3.2 正激式变换器	123	7.3 状态空间平均	179
5.3.3 Buck 衍生的推挽式开关		7.3.1 网络的状态方程	179
电路	127	7.3.2 基本的状态空间平均	
5.3.4 反激式开关电路	128	模型	180
5.3.5 Boost 电路衍生的隔离式		7.3.3 状态空间平均结果的	
开关电路	130	讨论	182
5.3.6 隔离式 Sepic 和 Cuk 电路	132	7.4 电路平均和平均开关建模	187
第 6 章 开关电源占空比控制芯片原理	137	7.4.1 获得时不变电路	189
6.1 开关电源系统的隔离技术	137	7.4.2 电路平均	189
6.2 开关电源控制芯片	138	7.4.3 微扰和线性化	190
6.3 电压模式控制芯片	138	7.4.4 三端开关网络	193
6.4 电流模式控制电路	140	7.5 开关电路统一的电路模型	196
6.5 软开关电源集成控制器	145	7.6 脉宽调制器的小信号模型	198

第 8 章 开关电路的传输函数及控制

部分设计 201

8.1 波特图回顾 201

8.1.1 单实极点响应 201

8.1.2 单实零点响应 203

8.1.3 较复杂的传输函数 205

8.2 双极点二次函数 206

8.3 二型误差放大器 208

8.4 三型误差放大器 210

8.5 变换器的传输函数分析 212

8.6 开关电源控制的设计 218

8.6.1 引言 218

8.6.2 反馈对传输函数的影响 219

8.7 稳定性 221

8.7.1 相位判据 222

8.7.2 相位裕量与品质因数的关系 223

8.8 补偿器的设计 223

8.8.1 简介 223

8.8.2 利用二型三型误差放大器 做补偿放大器 224

8.8.3 超前补偿器 225

8.8.4 滞后补偿器 226

8.8.5 滞后超前补偿器 227

8.9 设计实例 228

第 9 章 磁性元件 237

9.1 磁性材料的基本特性 237

9.1.1 磁场的基本物理量 237

9.1.2 磁路的欧姆定律 238

9.1.3 磁性材料的磁特性及其

功率损耗 239

9.1.4 线圈中的涡流 241

9.2 几种常用磁性器件 243

9.2.1 直流输出滤波电感 243

9.2.2 交流电感 243

9.2.3 耦合电感 244

9.2.4 变压器 244

9.2.5 反激式变压器 245

9.3 滤波电感设计 245

9.3.1 滤波电感设计的基本

约束条件 245

9.3.2 滤波电感铁芯的几何常数 247

9.3.3 滤波电感的设计流程 247

9.3.4 多绕组电感的设计 248

9.3.5 滤波电感设计举例 249

9.4 变压器设计 251

9.4.1 变压器设计的基本

约束条件 251

9.4.2 变压器的设计流程 253

9.4.3 变压器设计举例 254

第 10 章 软开关变换器简介 258

10.1 硬开关损耗 258

10.2 高频化与软开关 259

10.3 谐振开关的类型 259

10.3.1 准谐振开关电路 259

10.3.2 零开关 PWM 电路 262

10.3.3 零转换 PWM 电路 265

附录 常用符号及缩略语 270

参考文献 272

1.1 电力电子技术简介

2000 年, 美国电子学会 Thomas G. Wilson 给电力电子技术重新下了一个定义: 电力电子技术是通过静止的手段对电能进行有效的变换、控制和调节, 从而把可利用的输入电能形式变成所希望输出电能形式的技术。

IEEE 电力电子学会在网站上 (<http://www.pels.org>) 对电力电子技术给出的定义是: 电力电子技术是把电子电路应用到电能变换中的技术。它包括电子器件的使用、电路理论的研究和设计技术的应用, 以及为提高变换效果所需各种分析工具的开发。

通俗地说: 电力电子技术就是利用半导体器件实现电能的高效率应用的技术。

一般来说, 电力电子技术网络的拓扑结构包括一个开关转换网络。开关网络包含功率输入端与输出端、控制端, 如图 1.1 所示。控制端根据要求的输出控制输入, 通常可以完成 4 种基本功能。

AC-DC 转换: 将交流电转换成某一数值的直流电, 俗称整流或顺变 (rectifier)。常用的整流技术就是最基本、最简单的 AC-DC 转换。

DC-DC 转换: 将某一数值的直流电压转换成另一数值的直流电压。

DC-AC 转换: 将直流电压转换成某种波形、某一种电压的交流电, 俗称逆变 (inversion)。

AC-AC 转换: 将一种波形、频率、电压的交流电转换成另一种波形、频率、电压的交流电, 实现交-交变频变压。AC-AC 转换也可以用整流和逆变的方式来完成。

控制是必然的要求。人们总是希望在输入电压和负载电流变化时, 能够通过控制而产生一个调整好 (期望) 的输出电压。如图 1.2 所示, 一个控制器模块是任何电源处理系统不可分割的一部分。



图 1.1 开关转换器，基本的电源处理模块

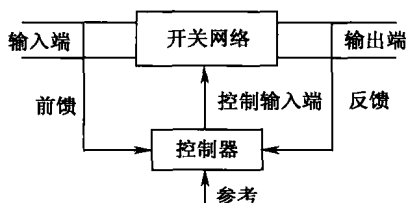


图 1.2 控制器一般都是必需的

在任何电源处理应用中，高效率都是必需的要求。首要原因通常并不是希望节省电费，抑或是节约能源，而是因为高效率转换器是以低效率转换器的结构，去产生大的输出功率，这是不切实际的（因为效率低了而输出功率又高的话，低效率会产生大量的热量使半导体器件烧掉）。转换器的效率可以用输出功率 P_{out} 与输入功率 P_{in} 之比表示。

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (1.1)$$

功率损耗可以表示为

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = P_{\text{out}} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (1.2)$$

式 (1.2) 可以用图 1.3 表示。在转换器效率为 50% 时，功率转换器耗散功率 P_{loss} 大致等于输出功率 P_{out} 。这些耗散功率转化成为热能，必须从转换器中移除。如果输出功率很大，那么损耗的功率同样很大。这就要求必须使用一个庞大而昂贵的冷却系统，否则会导致在转换器中的电子元件工作在高温下，降低了系统的可靠性。事实上，在高输出功率情况下，仅用现有技术可能无法充分冷却转换器元件。

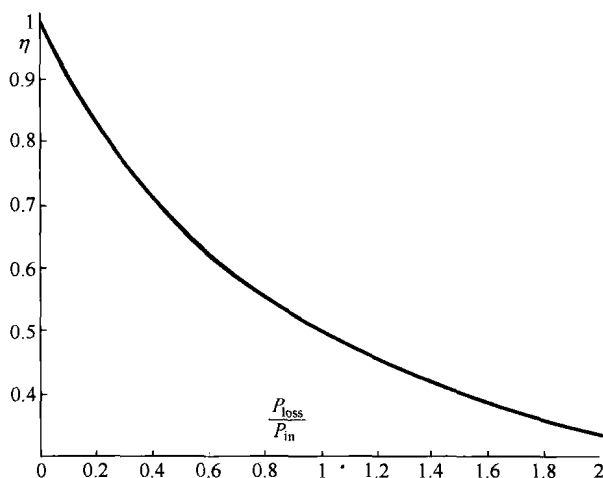


图 1.3 转换器的功率损耗与效率

提高效率的关键是获得较高的输出功率。例如，如果转换效率为 90%，那么，转换损失功率只有输出功率的 10%。因此，效率是衡量一种给定的开关转换网络是否成功的标准。如果转换器在转换过程以非常高的效率转换大的电力，由于极少的功率损耗，该转换器的元件可采用高密度封装，从而使转换器可以更小尺寸和更轻重量，以及较低的温度上升。

怎样才能建立这样一个电路，使其能够改变输入电压，并且有极低的功率损耗？图 1.4 所示的是各种传统的电路元件。现有的电路元件大致可以分为电阻元件、电容元件、磁性器件（包括电感器和变压器）、工作于线性模式的半导体器件（如 A 类或 B 类放大器）以及工作于开关模式的半导体器件（如在晶体管作为逻辑器件时，要么饱和，要么截止）。在传统的信号处理应用中，尤其是当效率并不是首要关注的问题时，磁性器件通常应避免使用，这主要是由于磁性器件体积大，而且难以将其应用于集成电路。但是，电容和磁性器件却是开关转换器的重要组成部分，因为在理想情况下它们几乎不存在功率消耗。倒是电阻元件以及线

性模式半导体器件要避免使用的。开关模式的半导体器件也是开关转换器的重要部分。当半导体器件工作在截止状态时，其通过的电流为零，因此其功耗为零。当半导体器件工作在导通状态时，其电压很小，因此其功耗也很小。无论在哪种情况下，半导体器件功率消耗都很低。因此，电容、电感元件以及开关模式半导体器件可用于制造高效率的转换器。

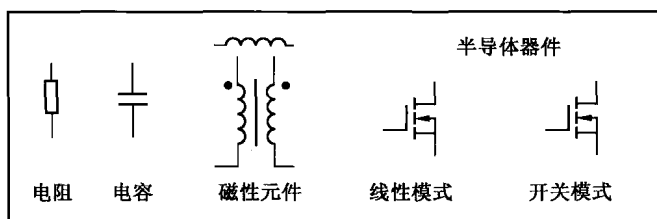


图 1.4 电路设计中的基本元器件

下面以图 1.5 为例来说明如何构建简单的 DC-DC 转换器。输入电压 V_g 为 100V，它提供 50V 电压给 5Ω 的有效负载，由此负载电流为 10A。

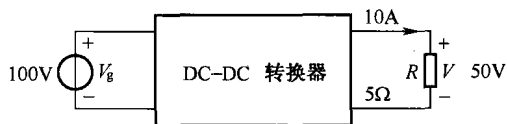
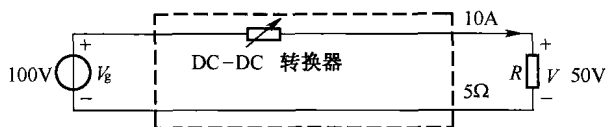
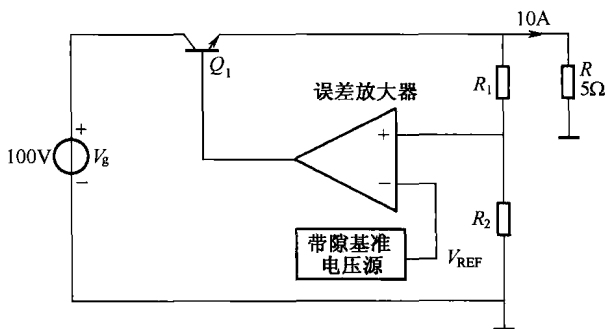


图 1.5 500W 的 DC-DC 转换器结构

图 1.6 (a) 描述了以低效率的方法来完成所需的功能——分压器电路。在 DC-DC 转换器中可由简单的可变电阻来调整，使其获得所需的输出电压。负载电流流经可变电阻。在指定的电压和电流的水平，可变电阻上的功率消耗 P_{loss} 等于负载功率 P_{out} ， $P_{\text{out}}=500\text{W}$ 。电源 V_g 提供的功率 $P_{\text{in}}=1\,000\text{W}$ 。



(a)用电阻实现电压变换



(b)线性稳压电源

图 1.6 两种 DC-DC 实现方案

图 1.6 (b) 所示为一个更实际的电路实现，通常我们被称之为线性串联稳压器。线性模式功率晶体管取代了图 1.6 (a) 中的可变电阻，其基极电流由反馈系统控制从而获得所期望的输出电压。图 1.6 (b) 所示的线性模式晶体管的功率损耗，大致与图 1.6 (a) 中 500 W 的可变电阻的功率损耗相同。人们普遍认为串联稳压器的应用范围只有在数瓦的低功率水平。

20 世纪 60 年代以前,人们普遍采用线性稳压器作为直流电源,美国仙童(Fairchild)半导体公司于 20 世纪 70 年代首先推出了 $\mu\text{A}7800$ 系列和 $\mu\text{A}7900$ 系列三端固定式集成线性稳压器,大大简化了电源的设计。到目前为止,国内外生产的集成线性稳压器多达数千种,包括三端固定输出、三端可调输出、多端固定输出、多端可调输出。按电压来分,又可分为正压输出、负压输出以及跟踪式正、负压输出。

线性稳压器因调整管工作在线性区而得名,其优点是稳压性能好,输出纹波小,电磁干扰低,电路简单,成本低廉。主要缺点是调整管压降大,功耗高,稳压电源的效率低,体积大,只能降压,不能升压,输入与输出有公共端,不易实现隔离。

随着现代科技的发展,采用电池供电的便携产品(如手机、MP3 播放器)的主电源已经从过去的 3.3V 降到 1.5V 以下。这类系统的芯片就工作在 1.5V 或更低电压上,例如内置 1.2V 的信号处理器。单从提高电源效率的角度看,开关电源应是最理想的选择。但是开关电源无法在低电压下正常工作,即使采用同步整流技术,也不可能将 1.5V 电源转换成 1.2V。同样普通的 PNP 型低压差线性稳压器也难以胜任此项任务,因其管压差就有 0.5V 左右。最好的解决方案就是采用超低压差稳压器,如图 1.7 所示。它是 21 世纪初在 LDO(低压差线性稳压器)的基础上发展起来的新型线性集成稳压器。

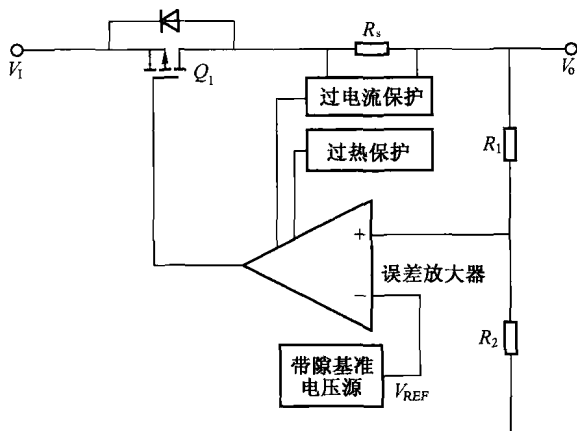


图 1.7 超低压差稳压器

这种 VLDO 可为微控制器 (MCU)、微处理器 (μC)、可编程逻辑电路 (PLD)、现场可编程门阵列 (FPGA)、数字信号处理等低压数字 IC 提供电源。

超低压差稳压器 (VLDO) 的工作原理如图 1.7 所示,这里采用 P 沟道场效应管来代替 PNP 型功率管作为调整管。其栅极驱动电流极小,而通态电阻非常低,通态压降远低于双极性晶体管的饱和压降。这不仅大大降低输入输出压差,还便于在微封装下输出更大的电流。图中 R_s 为电流检测电阻。

一个单刀双掷 (SPDT) 开关连接如图 1.8 所示。开关置于位置 1 时,该开关的输出电压 $v_s(t)$ 等于转换器的输入电压 V_g ; 开关置于位置 2 时,输出为 0。该开关的位置周期性变化如图 1.8 所示,从而使 $v_s(t)$ 是一个具有频率 f_s 和周期 $T_s = 1/f_s$ 的长方形波形,如图 1.9 所示。占空比 D 是指开关位于位置 1 的时间与整个周期之比,其范围为,

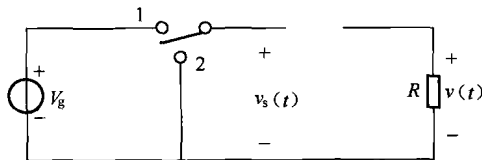


图 1.8 SPDT 开关的插入改变了电压的直流分量

$0 \leq D \leq 1$ 。在实际情况下, SPDT 开关是通过控制电路, 采用开关模式半导体器件来实现其功能的。

该开关改变了电压的直流分量。由傅里叶分析可知, 周期波形的直流分量等于它的平均值。因此, $v_s(t)$ 的直流分量是

$$V_s = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) dt = DV_g \quad (1.3)$$

因而, 开关通过对占空比 D 的控制来改变直流电压。要使输入电压 $V_g = 100\text{V}$ 转换为理想的输出电压 $V = 50\text{V}$, 必须使其占空比 $D = 0.5$ 。

再则, 开关的功率耗损最好为零。当开关处于闭合状态时, 若它的电压为零, 则功耗也为零; 当开关处于打开状态时, 电流是零, 功耗也为零。因此, 我们可以无损地改变直流电压分量。

除了所需的直流分量 V_s , 开关输出电压波形 $v_s(t)$ 还包含开关频率的不良谐波。在大多数应用中, 这些谐波必须被消除, 才能使输出电压 $v(t)$ 基本上等同于直流分量 $V = V_s$ 。图 1.10 所示的电路采用单节 L-C 低通滤波器来滤除有害谐波。如果滤波器的角频率 f_0 能够低于开关频率 f_s , 那么基本上通过滤波器的只有 $v_s(t)$ 的直流分量。如果该开关的电感器及电容器的性能都是理想的, 那么该 DC-DC 转换器的效率可达 100%。

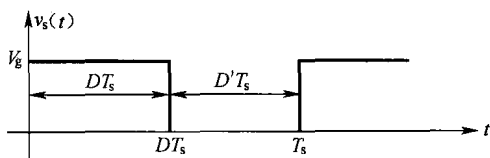


图 1.9 改变输出电压波形 $v_s(t)$

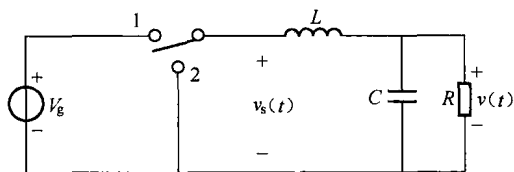


图 1.10 Buck 添加 L-C 低通滤波器, 用于消除开关谐波

在图 1.11 中, 为调节输出电压加入了一个控制系统。输出电压是开关占空比的函数, 控制系统可以产生不同的占空比使输出电压跟随给定的参考电压。图 1.11 也说明了用开关模式半导体器件实现 SPDT 开关的典型的方法。该变换器的功率级是如图 1.8、图 1.10 所示的 Buck 转换器, 所以输出直流电压低于输入直流电压。

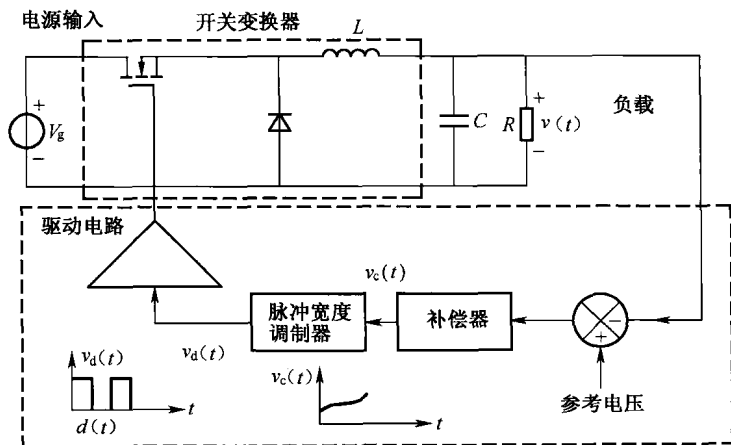
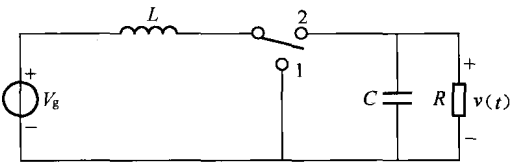


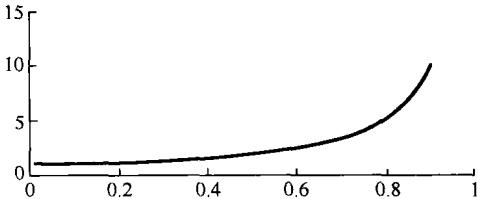
图 1.11 添加控制系统调节输出电压

可以构造其他变换器功能的源处理形式。例如，图 1.12 (a) 中的电路称为升压 (Boost) 变换器，是将图 1.10 中 SPDT 开关的位置和电感的位置互换而得到。这种变换器能够产生比输入电压值更大的输出电压。图 1.12 (b) 为输出 Boost 输出特性。一般情况下，使用一个嵌入开关器件的变换器可以使任何特定的输入电压转化成任何所需的输出电压。

开关电源因调整管工作于开关状态而得名。开关电源设计比较复杂，它的构成可以无工频变压器，因而体积小，功率密度高，效率高。其缺点是输出电压稳定度较差，输出纹波大，有电磁干扰问题。因此，在现代电源应用领域，虽然线性调整器的效率非常低，但它仍占有一席之地。



(a) Boost 电路



(b) Boost 电路输出特性

图 1.12 (Boost) 升压变换器

1.2 开关电源

开关电源是以开关转换器为主要组成部分，用闭环自动控制来稳定输出电压，并在电源中加入保护环节的电源。开关转换器是指采用半导体功率开关器件作为开关管，通过对开关管的高频开通与关断控制，将一种电能形态转换为另一种电能形态的装置。

图 1.11 所示的是采用 Buck 做转换器的开关电源。有很多种类型的电路可以作为开关电源的主电路，如图 1.12 所示的 Boost 开关电路等。因此，更一般的通用框图如图 1.13 所示。

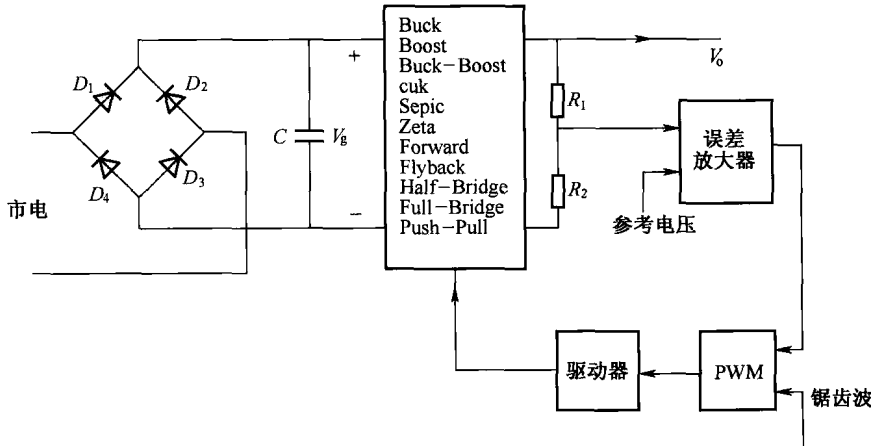


图 1.13 通用开关电源框图

1.2.1 开关电源的分类

现代开关电源有两种，一种是直流开关电源，另一种是交流开关电源。我们只介绍直流开关电源，其功能是将电能较差的原生态电源（粗电），如市电电源或蓄电池电源，转为满足

设备要求的质量较高的直流电源（精电）。

按照开关管的开关条件，DC-DC 转换器又可分为硬开关（Hard Switching）和软开关（Soft Switching）。硬开关是在承受电压或流过电流的情况下开通或关闭电路的，因此，在开通或者关断过程中将会产生较大的交叠损耗，即所谓的开关损耗。而且，开关频率越高，开关损耗越大。同时，在开关过程中还会激起电路分布电感和寄生电容的振荡，带来附加损耗，因此，硬开关 DC-DC 转换器的开关频率不能太高。软开关 DC-DC 转换器的开关管，在开通或是关断过程中，或是加于其上电压为零，即零电压开关（ZVS），或是通过开关管的电流为零，即零电流开关（ZCS）。这种开关可以显著地减小开关损耗以及在开关过程中激起的振荡，使开关频率可以大幅度地提高，为转换器的小型化和模块化创造了条件。

直流 DC-DC 转换器按照输入与输出之间是否有电气隔离可以分为两类：一类是有隔离的，称为隔离式 DC-DC 转换器；另一类是没有隔离的，称为非隔离式 DC-DC 转换器。

若按激励形式来分，可分为自激式与它激式。

1.2.2 开关电源的发展

1. 开关电源的技术发展历程

随着许多电器具尺寸的不断减小，供电电源所占的比例变得大得多，人们在降低开关电源的体积、重量方面做了不少的工作。发展小型化轻型电源，对便携式电子设备（如移动电话）尤为重要。

为了实现高功率密度，必须提高 PWM（脉宽调制）开关电源工作频率。例如 1980 年以前，功率变换器的开关频率为 20~50kHz，从 20 世纪 80 年代起，提高开关频率成为减小开关电源尺寸的最有效手段，同时也改善了电源的动态性能。现在 200~500kHz 已经成为 100W 输出 DC-DC 功率变换器的标准开关频率。图 1.14 所示为 20 世纪 60~90 年代通信和计算机用开关电源高频化的历史进程。可见，随着工作频率的提高，开关电源单位功率体积（ cm^3/W ）也不断减小。

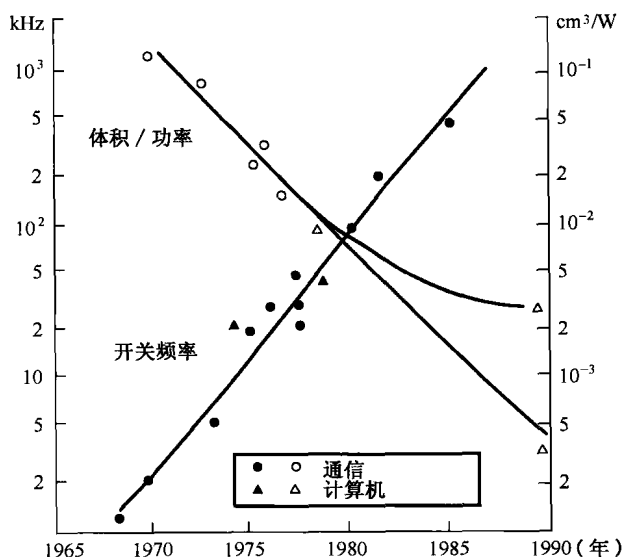


图 1.14 电源高频化历程

2. 20 世纪推动开关电源发展的主要技术

(1) 功率半导体器件。功率金氧半场效晶体管 (MOSFET) 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 已经完全可代替功率晶体管 (GTR) 和中小电流的晶闸管, 使实现开关电源高频化有了可能。超快恢复功率二极管和 MOSFET 同步整流技术的开发, 也为研制高效率或低电压的开关电源创造了条件。

(2) 软开关技术。脉宽调制 (PWM) 开关电源按硬开关模式工作, 开关器件的电压和电流波形有交叠, 因而开关损耗大。PWM 开关电源高频化可以缩小体积重量, 但频率越高, 开关损耗越大。为此必须研究开关电压和电流不交叠的技术, 即所谓的零电压开关 (ZVS) 和零电流开关 (ZCS) 技术, 或称为软开关技术。

3. 开关电源的发展方向

进入 21 世纪, 开关电源将有更大的发展。

(1) 高性能碳化硅 (SiC) 功率半导体器件。可以预见, 碳化硅将是 21 世纪最可能成功应用的新型半导体材料, 碳化硅的优点是禁带宽, 工作温度高 (可达 600°C), 通态电阻小, 导热性能好, 漏电流极小, PN 结耐压高, 等等。

(2) 高频磁技术。高频开关变换器中使用了多种磁元件, 有许多基本问题要研究。

随着开关电源高频化, 在低频下可以忽略的某些寄生参数, 在高频下将对某些电路性能 (如开关尖峰能量、噪声水平等) 产生重要影响。尤其是磁元件的涡流、漏电感、绕组交流电阻和分布电容等, 在低频和高频下表现有很大不同。

(3) 新型电容器。研究开发适合功率电源系统用的的新型电容和超大电容, 要求电容量大、等效串连电阻小、体积小等。

(4) 高频开关电源的电磁兼容性研究。通常, 它涉及开关过程产生的 $\frac{di}{dt}$ 和 $\frac{dv}{dt}$, 引起强大的传导型电磁干扰和谐波干扰。

(5) 低电压、大电流开关电源开发。

① 低电压、大电流变换器的要求。

数据系统的速度和效率日益提高, 新一代处理器的逻辑电压低至 $1.1\sim 1.8\text{V}$, 而电流达 $50\sim 100\text{A}$ 。其供电电源一低压大电流输出 DC-DC 转换器模块, 又称电压调整模块 (VRM)。新一代微处理器对 VRM 的要求是输出电压很低, 电流变化率高, 响应快等。

a. 为降低 IC 的电场强度和功耗, 必须降低微处理器的供电电压, 因此 VRM 的输出电压要从传统的 3V 左右降低到小于 2V , 甚至小于 1V 。

b. 运行时, 电源输入电流大于 100A , 由于寄生 L、C 参数, 电压扰动大, 应尽量减小 L。

c. 微处理器启动频繁, 不断从休眠状态启动、工作, 再进入休眠状态。因此要求 VRM 电流从 0A 突变到 50A , 又突降到 0A , 电流变化率达 5A/ns 。

d. 设计时应控制扰动电压小于 10% , 允许输出电压变化 2% 。

② 采用波形交错技术。

③ 电压纹波与冲击电压问题。

④ 探寻省略滤波电容的可能性。

⑤ 便携设备与燃料电池。

以 Intel VRM9.0 (Pentium IV) 为例, 其技术规范如下。

- 输入电压 11.04~12.6V
- 输入电流 15A（输入电压为 12V）
- 输出电压 1.6V，在 1.1~1.85V 之间可调
- 效率 大于 80%（输入电压 12V，额定负载）
- 输出电流 满载 60A，最小 100mA
- 纹波 50mV
- 电流转换速率 50A/μs（负载阶跃变化从 100mA 到满载，或反之）
- 均流准确度 环流小于 10%额定电流

2000—2004 年，Intel 公司生产台式计算机 CPU 的电压、电流要求发展历程如表 1-1 所示。

表 1.1

参数	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年
电压/V	1.6	1.3	1.3	1.2	1
电流/A	55	60	70	75	80
电流转换速率/A/μs	320	320	400	400	400

IEEE Spectrum 1999 专家指击，2012 年以前 VLSI 对 VRM 的要求如表 1.2 所示。

表 1.2

	1997~2001 年	2003~2006 年	2009~2012 年
晶体管密度/ $10^6/\text{cm}^2$	4~10	18~39	84~180
特征尺寸/nm	250~150	130~100	70~50
频率/MHz	200~300	530~1 100	840~1 830
功率/W	1.2~61	2~96	2.8~109
电压/V	1.2~2.5	0.9~1.2	0.5~0.9

高端服务器、通信设备、微型计算机和主机电源一般采用分布式电源结构，如图 1.15 所示。交流电压经过前端转换器转换成 DC48V，然后再经过 DC-DC 转换器降为 DC12V 或 5V。48V 和 5/12V 母线都可以接 VRM，输出 1~1.2V 给微处理器。因此一般说来，VRM 的输入电压有高低两种。高电压输入 48V，低电压输入为 5V 或 12V。不同输入电压的 VRM 所用的 DC-DC 转换器的主电路是不同的。

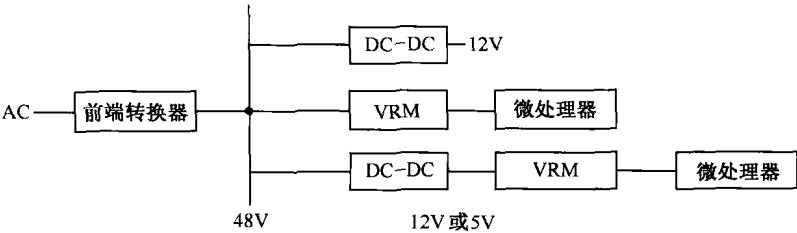


图 1.15 分布式电源