

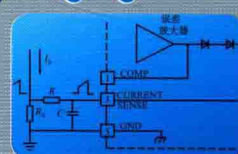
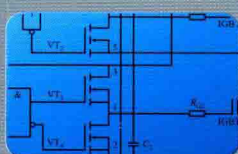
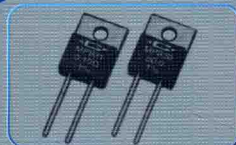
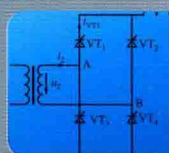
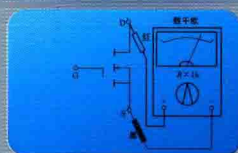
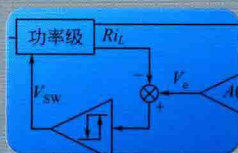
基本原理+设计方法+实例剖析



开关电源设计 入门与实例剖析

聂金铜 杨贵恒 叶奇睿 文武松 编著

KAIGUAN DIANYUAN
SHEJI RUMEN
YU SHILI POUXI



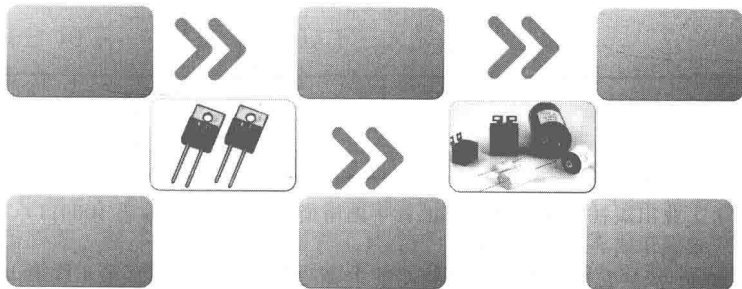
化学工业出版社



开关电源设计 入门与实例剖析

聂金铜 杨贵恒 叶奇睿 文武松 编著

KAI Guan DIANYUAN
SHEJI RUMEN
YU SHILI POUXI



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

开关电源设计入门与实例剖析/聂金铜等编著.
北京: 化学工业出版社, 2016. 4
ISBN 978-7-122-26369-8

I. ①开… II. ①聂… III. ①开关电源-设计
IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 036833 号

责任编辑: 高墨荣
责任校对: 王素芹

文字编辑: 徐卿华
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
710mm×1000mm 1/16 印张 25 $\frac{1}{4}$ 字数 538 千字 2016 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

前 言 FOREWORD

开关电源具有效率高、功耗低、体积小、重量轻等一系列优点，其电源效率可达80%以上，比传统的线性稳压电源提高近一倍。开关电源的应用领域十分广泛，不仅包括仪器仪表、测控系统和计算机内部的供电系统，还适用于各种消费类电子产品。开关电源代表了稳压电源的发展方向，现已成为稳压电源的主流产品。目前，开关电源正朝着集成化、智能化、模块化的方向发展。

本书按照“基本原理——设计方法——实例剖析”三个层次进行介绍，层次清晰。其中，第一部分按照基本概念与设计流程、常用无源器件、常用电力电子器件、电路拓扑结构的顺序进行介绍；第二部分按照模块化的结构介绍了开关电源功率电路、控制电路、辅助电路和印制电路板的设计；第三部分介绍了几个典型开关电源设计实例以及数字电源设计过程。本书在介绍开关电源基础理论过程中，力求简化繁琐的理论推导，尽量做到通俗易懂、循序渐进、深入浅出，使初学者对开关电源有一个全面了解。

开关电源技术涉及模拟电子技术、数字电子技术、电力电子技术、自动控制理论等多种学科，开关电源的设计与制作要求设计者具有丰富的实践经验，既要完成设计制作，又要懂得调试、测试与分析等。设计者只有在电路板布局、布线方法以及高频变压器设计等方面拥有足够的经验才能使开关电源的各项性能指标得以实现。希望读者在阅读本书的基础上，积极从事开关电源的设计、开发、制作与测试，从而达到理论与实践的统一。

本书共分10章，内容主要包括以下三大部分。

第一部分：开关电源的基本原理，包括第1~4章。其中，第1章介绍了开关电源的基本概念、设计制作流程及其发展趋势；第2章介绍了常用无源器件（电阻器、电容器、电感与变压器）的作用、特性、主要参数及其选用；第3章介绍了常用电力电子器件（电力二极管、电力晶体管GTR、功率场效应管MOSFET和绝缘栅双极晶体管IGBT）的工作原理、基本特性、主要参数、检测方法及其驱动电路等。第4章对开关电源电路拓扑结构进行了详细介绍，首先对非隔离型直流变换器的主电路拓扑进行了介绍，并重点对常见的三种DC/DC电路（Buck、Boost、Buck-Boost）的拓扑结构、工作原理、关键点的波形图进行了论述；然后说明了隔离型直流变换器中变压器所起的作用，并对单端反激、单端正激、推挽、全桥和半桥式电路等几种拓扑结构、工作原理进行了介绍，还给出了参数的计算方法；最后对同步整流电路、移相软开关电路和功率因数校正电路进行了介绍。

第二部分：开关电源的设计，包括第5~8章。其中，第5章介绍了开关电源功率电路设计，包括功率主电路设计、磁性元器件的设计、热设计等；第6章以电压型PWM集成控制器（SG2525A、TL494）、电流型PWM集成控制器（UC3842、UC3846/UC3847）以及移相式全桥PWM集成控制器（UC3875、UC3879）为例，重点介绍了几种PWM集成控制器的性能特点、引脚分布，工作原理等，并举例说明了其典型应用电路；第7章辅助电路设计包括滤波电路设计、闭环控制电路设计、保护电路设计、缓冲电路设计、辅助电源设计和驱动电路设计等；第8章论述了开关电源印制电路板（PCB）常用材料及其安装方法，PCB设计的基本原则与注意事项，并列出了几个应用实例。

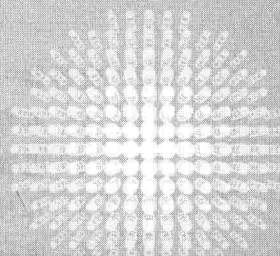
第三部分：开关电源设计实例剖析，包括第9章和第10章。其中，第9章给出了开关电源的几种典型应用实例，包括TOPSwitch系列开断电源、反激式同步整流5V/3A适配器、48V/20A通信用开关电源以及模块化直流操作电源等；第10章对数字电源设计作了比较详细的介绍，首先对电源的数字化控制进行了简要介绍，然后简述了TI数字电源库的使用，最后对基于DPLib的数字PFC电源设计和使用PSIM仿真软件设计数字电源进行实例剖析。

本书由聂金铜、杨贵恒、叶奇睿和文武松等编著，张颖超、钱希森、景有泉、李龙、刘扬、任开春、曹均灿、龚伟、强生泽、张海呈、向成宣、阮喻、刘凡、金丽萍、张瑞伟、龚利红、赵英和杨波也参加了编写，蒲红梅、张传富、朱真兵、李世刚、赵志旺、刘嫣婷、余江和蒋王莉等做了大量的资料搜集与整理工作。在编写和出版过程中，得到了重庆通信学院教保科和电力工程系全体同仁的大力支持与帮助，并提出了许多修改意见，在此表示衷心感谢！

本书的特点是由浅入深，通俗易懂。其中开关电源的电路拓扑结构，开关电源功率电路、控制电路、辅助电路设计，电路板的布局、布线方法等内容的阐述系统、深入。可供从事开关电源设计、生产、调试、使用与维修的工程技术人员阅读，也可供高等院校电气工程、电力工程及其自动化、电力电子与电力传动和通信电源等相关专业师生参考。

随着开关电源技术的快速发展，现代电源新理论与新技术不断涌现，由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编著者



目 录 CONTENTS

第 1 章 绪论

1.1 开关电源的基本概念	1
1.1.1 电能变换电源	1
1.1.2 电能变换电源的基本类型	3
1.1.3 开关电源	3
1.2 开关电源设计制作流程	7
1.2.1 确定电路拓扑结构	7
1.2.2 选择控制电路	8
1.2.3 确定辅助电路	9
1.2.4 整理电路原理图	9
1.2.5 制作高频变压器	9
1.2.6 设计印制板	10
1.2.7 安装调试	11
1.3 开关电源的发展趋势	12
1.3.1 电力电子技术的发展动态	12
1.3.2 开关电源设备的发展趋势	13

第 2 章 常用无源器件

2.1 电阻器	16
2.1.1 电阻器的作用	16
2.1.2 电阻器的特性	16
2.1.3 几种常用的电阻器	17
2.1.4 电阻器的型号	19
2.1.5 电阻器的主要参数	20
2.1.6 电阻器的标识方法	21

2.2	电容器	23
2.2.1	电容器的结构与分类	23
2.2.2	电容器的特性	25
2.2.3	几种常用的电容器	26
2.2.4	电容器的主要参数	32
2.2.5	电容器的型号与标识	34
2.2.6	电容器的检测	36
2.3	电感与变压器	41
2.3.1	常用的软磁材料	41
2.3.2	电感	45
2.3.3	变压器	48

第3章 常用电力电子器件

3.1	电力二极管	53
3.1.1	工作原理	53
3.1.2	伏安特性	54
3.1.3	主要参数	55
3.1.4	主要类型	56
3.1.5	检测方法	57
3.2	电力晶体管 GTR	58
3.2.1	工作原理	58
3.2.2	基本类型	59
3.2.3	特性参数	60
3.3	功率场效应晶体管 MOSFET	65
3.3.1	工作原理	66
3.3.2	主要特性	67
3.3.3	主要参数	69
3.3.4	检测方法	70
3.4	绝缘栅双极晶体管 IGBT	71
3.4.1	工作原理	72
3.4.2	基本特性	73
3.4.3	擎住效应	75
3.4.4	主要参数	75
3.4.5	安全工作区	76
3.4.6	检测方法	77

3.5 电力电子器件的驱动电路	78
3.5.1 电力电子器件对驱动电路的要求	78
3.5.2 直接(非隔离)驱动电路	80
3.5.3 集成驱动电路	84
3.5.4 隔离驱动电路	87

第4章 电路拓扑结构

4.1 非隔离型直流变换器	93
4.1.1 降压式直流变换器	93
4.1.2 升压式直流变换器	102
4.1.3 反相式直流变换器	104
4.2 隔离型直流变换器	106
4.2.1 单端反激式直流变换器	106
4.2.2 单端正激式直流变换器	113
4.2.3 推挽式直流变换器	116
4.2.4 全桥式直流变换器	121
4.2.5 半桥式直流变换器	124
4.3 其他电路拓扑结构	128
4.3.1 同步整流电路	128
4.3.2 移相软开关电路	131
4.3.3 功率因数校正电路	140

第5章 功率电路设计

5.1 开关电源功率主电路设计	146
5.1.1 单端正激变换电路设计	146
5.1.2 单端反激变换电路设计	148
5.1.3 双端变换电路设计	149
5.1.4 不同电路拓扑的磁化曲线	150
5.1.5 几种主电路的比较与选型	153
5.2 磁性元件的设计	154
5.2.1 磁性元件总体设计流程	154
5.2.2 磁芯尺寸选择	155
5.2.3 正激变压器设计	162
5.2.4 反激变压器设计	169
5.2.5 直流滤波电感设计	173
5.2.6 变压器绕制技术	175

5.3 散热设计	178
5.3.1 开关电源中的热源	178
5.3.2 散热设计方法	180
5.3.3 温度测试	182

第6章 控制电路设计

6.1 电压型 PWM 集成控制器	187
6.1.1 基本组成、型号及特点	187
6.1.2 SG3525A PWM 控制器	188
6.1.3 TL494 PWM 控制器	195
6.2 电流型 PWM 集成控制器	204
6.2.1 工作原理、型号及特点	204
6.2.2 UC3842 PWM 控制器	207
6.2.3 UC3846/UC3847 PWM 控制器	216
6.3 移相式全桥 PWM 集成控制器	223
6.3.1 型号及其特点	223
6.3.2 UC3875 移相式集成控制器	224
6.3.3 UC3879 移相式集成控制器	229
6.3.4 UC3879 与 UC3875 的比较	231

第7章 辅助电路设计

7.1 滤波电路设计	233
7.1.1 输入低通滤波电路	233
7.1.2 输入整流滤波电路	238
7.1.3 输出整流滤波电路	241
7.2 闭环控制电路设计	244
7.2.1 反馈取样电路	244
7.2.2 主电路控制-输出传递函数推导	247
7.2.3 补偿器分类及波特图分析	255
7.2.4 补偿器的参数设计	258
7.3 保护电路设计	265
7.3.1 过流保护电路	265
7.3.2 过压保护电路	268
7.3.3 过热保护电路	269
7.4 其他辅助电路设计	269
7.4.1 缓冲电路设计	269
7.4.2 辅助电源设计	271

7.4.3 驱动电路设计	273
--------------------	-----

第8章 印制电路板设计

8.1 印制电路板常用材料及其安装方法	276
8.1.1 常用 PCB 设计软件	277
8.1.2 印制电路板常用材料	285
8.1.3 印制电路板可制造性设计	286
8.2 印制电路板设计注意事项	288
8.2.1 印制电路板的元件布局考虑	288
8.2.2 印制电路板的布局规范	289
8.2.3 印制电路板的地线连接问题	296
8.2.4 印制电路板干扰与抑制问题	299
8.3 开关电源的印制电路板设计实例	300
8.3.1 TOP Switch 的 PCB 实例分析	300
8.3.2 UCC2895 的 PCB 实例分析	303
8.3.3 TPS54519 的 PCB 实例分析	305

第9章 开关电源设计实例剖析

9.1 TOPSwitch 系列开关电源设计实例	308
9.1.1 TOP 系列芯片简介	308
9.1.2 使用 PI-Expert 快速设计	311
9.1.3 设计实例及调试	315
9.2 反激式同步整流 5V/3A 适配器设计实例	317
9.2.1 原边反馈原理及控制芯片简介	318
9.2.2 同步整流控制技术	321
9.2.3 设计调试与典型波形	325
9.3 48V/20A 通信用开关电源实例剖析	331
9.3.1 交错 PFC 原理及控制芯片	332
9.3.2 ZVS 移相全桥变换器原理及控制芯片	336
9.3.3 电路设计	340
9.3.4 参数计算	344
9.3.5 调试步骤与典型波形	348
9.4 模块化直流操作电源实例剖析	350
9.4.1 主电路结构与原理	350
9.4.2 控制和保护电路	352
9.4.3 电路参数设计	355

9.4.4	并联均流原理及电路设计	356
9.4.5	热插拔和故障退出电路	358

第 10 章 数字电源设计与实例剖析

10.1	电源的数字化控制	360
10.1.1	数字控制的优点	360
10.1.2	控制芯片选型	361
10.1.3	开关电源的数字化控制	364
10.2	使用 TI 数字电源库	365
10.2.1	数字电源库 DPLib	365
10.2.2	基于模型和框架的快速设计方法	371
10.2.3	数字电源的工程调试	374
10.3	基于 DPLib 的数字 PFC 电源设计实例	375
10.3.1	主电路及参数设计	375
10.3.2	控制电路及参数设计	376
10.3.3	软件设计	378
10.3.4	使用 CCS 环境和 GUI 程序辅助调试	382
10.3.5	典型波形与调试注意事项	384
10.4	使用 PSIM 仿真软件设计数字电源	385
10.4.1	PSIM 仿真环境	385
10.4.2	仿真与代码自动生成	386
10.4.3	全数字控制降压变换器实例	388

参考文献

第1章 绪论

我们所说的“电”，其实是能量的一种形态，由另一种形态的能量转变而来。人们接触最多的是公用电网所提供的电源。无论企事业单位，还是家庭所使用的电能几乎都直接或间接地由电力网提供。电力网电源来自发电厂，目前发电厂的发电方式主要有火力发电、水力发电和核能发电等几种形式。火力发电是把热能转换为电能，水力发电是把机械能（水的位能）转换为电能，核能发电是把核能转换为电能。除上述三大主要发电方式外，还有风力发电、太阳能发电、氢能（燃料电池）发电等可再生能源发电方式以及柴油、汽油发电机组发电等应急发电形式。由公用电力网提供给普通用户的电源都是工频交流电源。另一种能提供电能的电源是化学电源，蓄电池、干电池、锂离子电池等就是其中的典型代表。这种电源所提供的电能虽然占的比例较小，但却与人们的日常生活越来越密切。虽然化学电源所存储的化学能是靠充电电源得到的，但因其在于利用（放电）时的电能是由化学能直接转变而来，所以化学电源仍然属于提供电能的电源。

电能源与当今人类的生产生活密不可分，也正因为如此，人们一直在努力探寻稳定高效的发电途径、方法和设备，认真研究区域性电能供给网络的合理架构和输配电模式，仔细分析用电设备对电能供给的质量要求，探索科学合理地利用电能的新理论与新技术，不断完善电能供给系统及其设备的开发、运行操作、维护管理等方面的理论与法规制度，以期更加科学合理、安全高效地开发与利用电能源。

1.1 开关电源的基本概念

1.1.1 电能变换电源

人们要开发与利用电能就必须有相应的技术途径、方法与相应的设备。广义上讲，凡是能够为用电者提供电能源的装置就可称其为电源，于是属于电能产生、传输、分配和变换等任何一个环节所使用的设备都可称其为电源设备。实际上，为了更准确地表达一种电源设备的功能与用途，一般将用于电能产生的设备或装置称为发电设备，如火力发电机组、水轮发电机组、风力发电机组、柴油发电机组等，人们通常将化学电源直接称为“××电池”，如铅酸蓄电池、锂离子蓄电池和燃料电池等；用于电能传输的设备或装置称为输电设备；用于电能分配控制的设备或装置称为配电设备；将具有电能变换功能的一类设备或装置称为电能变换电源。当然，

将广义上的电源设备进行分类的方法有多种，但其目的都是为使设备的功能、用途和特点在设备的名称上能够得以充分体现。

在有些情况下，发出电能的电源并不符合使用要求，需要进行再一次变换。这种变换是把一种形态的电能变换为另一种形态的电能。这种电能形态的变换可以是交流电与直流电之间的变换，也可以是电压或电流幅值的变换，或者是交流电频率与相数的变换。在有些场合下，这种电能形态的变换可能仅仅是稳定精度的提高或对其性能的改进。由于这种电源的输入也是电能，所以人们常把这种输入和输出都是电能的电源称为电能变换电源。

电能变换电源不能产生电能，只能起到对电能进行参数变换或稳定处理的作用。常用的电能变换设备主要有直流稳定电源和交流稳定电源两大类。人们之所以需要这种设备，主要是人们日常工作和生活所使用的各种用电设备对电能质量都有一定要求，这些要求通常包括供电电源是交流还是直流、电压额定值及其变化范围、频率额定值及其变化范围、最大功率等，其中对供电电压的要求是最常见的也是最重要的一项要求。例如，有的用电设备要求为之提供额定频率为 50Hz、额定电压为 220V 的交流电，而且电压变化不超过其额定值的 $\pm 10\%$ ，即电压应在 198~242V 之间，如果超出这个范围，可能导致用电设备工作不正常；采用锂离子电池的手机配套充电电源，要求其输出为直流，电压上限为 4.2V，且最大输出电流要控制在某额定值以下，否则就有可能导致锂离子电池损坏。自动化程度较高的生产线，对供电电压保持稳定不变的要求比手机充电电源等生活用电设备更严格。

由此可见，电能变换设备是一种介于发电设备与用电设备之间的必备设备，是一种介于发电设备与用电设备之间的电能加工厂。仅就用电设备的供电电压而言，其值应该具有一定的稳定性，最好是供电电压稳定不变。用电设备一经确定之后，为之供电的电压也就确定了，于是为之供电的电源电压能否满足用电设备需求，就成了由供电电源本身决定的事。一般来说，当供电电源电压的稳定性不能满足负载要求时，最简单的办法就是在负载前面加装一个调压器，这个调压器送给负载的可以是直流也可以是交流，通过调压器将供给负载的电压调到符合要求。但人工调整不但麻烦，有时甚至是不可能的，于是能够自动调整与稳定电压的电源（稳压器）便应运而生。这种电源的功能就是自动保持输出电压的稳定，当然，这里所说的“稳定”，是指电压的变化较小，并不是绝对不变。

要制造这种自动稳压的电能变换设备（包括实现参数变换或稳定处理的其他设备），就必须有相应的技术理论作支撑，这种技术理论就是电力电子（Power Electronics）技术。电力电子技术是以电能控制和变换为研究对象的电子技术，它是一门利用由电力电子器件构成的电能变换电路对电能进行变换和控制的学科，可以认为电力电子技术就是电能处理技术。正是由于电力电子技术在电能变换设备中的支撑作用，人们通常将利用电力电子技术而制造出的电能变换设备称之为电力电子电源或功率变换电源。

1.1.2 电能变换电源的基本类型

一般而言，一次电能有交流和直流两种形式，而用电设备对电能的要求也有直流和交流两种。因此，电能变换也就围绕直流电和交流电的相互变换而展开。按照这种观点，电能变换电源就可根据其电能变换过程中的功能和作用，按输入和输出的电能形式，将其分为以下四种：交流电变换为直流电（AC/DC）、交流电变换为交流电（AC/AC）、直流电变换为交流电（DC/AC）和直流电变换为直流电（DC/DC）。而且将实现交流电变换为直流电的设备称为整流器，将实现交流电变换为交流电的设备称为交流稳压器（稳定输出交流电压而不稳定输出交流电频率）或变频器（既可改变输出交流电压又能改变输出交流电频率），将实现直流电变换为交流电的设备称为逆变器，将实现直流电变换为直流电的设备称为直流变换器。在以上的分类名称中，之所以将各种电能变换设备都称为“器”，其原因有两个方面，一是“器”字本身表示了装置的概念，二是用“器”字表示了装置的相对静止，以此区别有机械运动类的电源设备。如，柴油机、汽油机、电动机和发电机等都表示其自身含有机械运动过程或环节，因此这类设备都称为××“机”。

当然，以上对电能变换类电源进行分类的方法不是唯一的，也就是说对电能变换类电源还有其他的分类方法，如，依照输出是直流还是交流而分为直流电源和交流电源，依照所采用的具体技术不同，可分为线性电源、相控电源和开关电源等。有些时候人们更习惯于将各种分类方式综合使用，例如，将采用线性调整技术制造的整流器称为线性电源，将采用开关变换技术制造的整流器称为高频开关整流器或高频开关电源。

1.1.3 开关电源

众所周知，很多电子装置和电气控制设备的工作电源是直流电源。而在开关电源出现之前，这些装置的工作电源大都采用线性电源。

线性电源是一种用功率调整管与负载串联，使输出直流电压或电流稳定的设备，也叫作串联调整型直流稳定电源。它有直流稳压型和直流稳流型两种。线性电源一般由工频变压器、不可控整流滤波电路、调整管和控制电路等几部分组成，如图 1-1 所示。输入交流电经变压器隔离变压、整流滤波、调整管调整，向负载提供电压或电流稳定的直流电能。当输入端交流电压或负载端电流变化引起输出不稳定时，控制电路根据输出的变化，适时改变调整管的压降（导通程度），使输出的直流电压或电流保持稳定。线性电源具有电路简单、纹波小、电磁兼容性好、稳压精

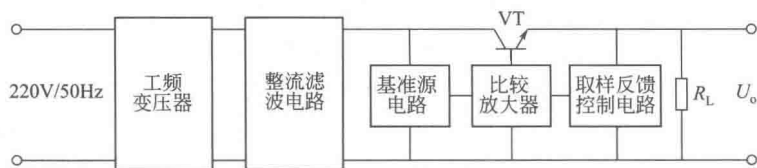


图 1-1 线性电源工作原理框图

度高、成本低等优点，但其内部功耗大、效率低、比质量大、输入电压动态范围小、输出电压不能高于输入电压等缺点也非常明显，将其作为小功率直流电源，尤其是微功率直流电源比较适宜。

随着电子技术的不断发展，电子装置的集成度不断增加，功能越来越强，其体积却越来越小。因此，迫切需要体积小、重量轻、效率高、性能好的新型电源，以适应电子设备的发展需求，于是这种需求就转化成了开关电源技术发展的强大动力。

线性电源的效率之所以不高，其根本原因是调整管工作在线性放大状态及调整管与负载呈串联关系。这种工作模式造成了调整管两端有较大压降，重载时的功率损耗势必较大，这在交流输入电压高于额定值时更是如此。

为了减少功率损耗，人们首先想到的就是改变功率管的工作状态，即调整管不是工作在线性放大状态而是工作在饱和与截止两种状态，即将功率管当作一个开关，从而减小功率管两端压降，进而减小其功率损耗。这种工作模式的改变带来了两个问题，一是如何为负载提供平滑的直流电，二是如何稳定输出直流电压。解决第一个问题的方法是采用低通滤波器滤波，解决第二个问题的方法是采用时间比例控制（TRC——Time Ratio Control）。所谓时间比例控制是指控制功率开关管的饱和导通与截止的时间成比例。具体的实现方法可以是饱和导通及截止总时间（周期）固定，改变功率管的饱和导通时间从而改变时间比例，这种方法被称为脉宽调制（PWM——Pulse Width Modulation）；其次是功率管饱和导通时间固定，改变功率管的饱和导通及截止总时间（周期）从而改变时间比例，这种方法被称为脉频调制（PFM——Pulse Frequency Modulation）；第三是功率管的饱和导通及截止总时间（周期）及功率管饱和导通时间均不固定，可通过改变周期和饱和导通时间来改变时间比例，这种方法被称为混合调制。上述三种调制方法中，脉宽调制的应用最为广泛与普及，基于线性电源和脉宽调制思想实现的开关电源原理框图如图 1-2 所示。

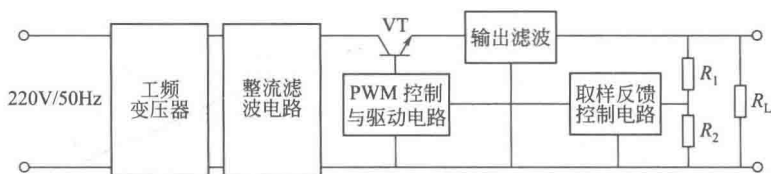


图 1-2 基于线性电源和脉宽调制思想实现的开关电源原理框图

其次，为了减小线性电源的体积并减轻其重量，如何去掉交流输入工频变压器就成了关键问题。在图 1-2 中，如果简单地去掉工频变压器，电路就存在着整流后的直流电压与后续电路的匹配以及输入与输出的电气隔离问题。经人们研究和探索后发现，可以在功率开关器件之后插入变压器，该变压器的体积和重量会随着功率开关器件的频率升高而下降，从而减小整个电源的体积和重量。按照这种思想得到了如图 1-3 所示的无工频变压器（有高频变压器 T）开关电源原理框图，这就是典型的高频开关电源电路结构图。

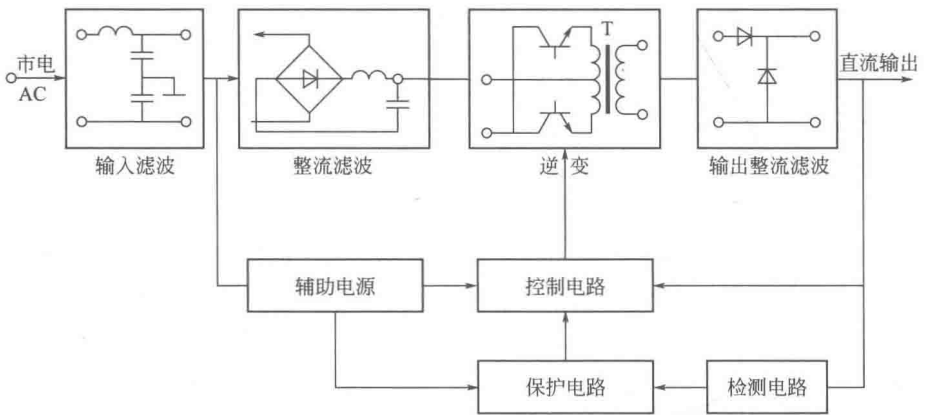


图 1-3 典型的高频开关电源电路结构图

高频开关电源的主要优点就在于“高频”二字，从《电路》中知道，铁芯电路与无铁芯电路的主要区别见表 1-1。

表 1-1 铁芯电路与无铁芯电路的主要区别

铁芯电路	无铁芯电路
μ_r 大,不是常量	$\mu_r \approx 1$,常量
L 大,不是常量	L 小,是常量
φ 与 i 不成正比	φ 与 i 成正比
除铜损外,还有铁损	只有铜损,无铁损

由表 1-1 可见，铁芯电路不能用视 L 为常数的有关公式，如 $e = -L di/dt$ 等，只能用基本公式 $e = -Wd\Phi/dt$ 等。设铁芯中磁通按正弦规律变化，即 $\Phi = \Phi_M \sin\omega t$ ，由此可知： $e_L = -Wd\Phi/dt = -\omega W\Phi_M \cos\omega t = -E_M \cos\omega t$ ， $E_M = \omega W\Phi_M = 2\pi f W\Phi_M$ 。在正弦情况下， $E_M = \sqrt{2}E$ ，因此：

$$E = 2\pi f W\Phi_M / \sqrt{2} = 4.44 f W B_M S$$

式中 f ——通过铁芯电路的电源频率；

W ——铁芯电路线圈匝数；

B_M ——铁芯的磁感应强度；

S ——铁芯线圈的截面积。

以上公式是计算变压器和一切铁芯电路匝数与所需铁芯截面的基本公式，从公式中不难看出：频率越高，铁芯的截面积可以设计得越小，如果能把频率从工频 50Hz 提高到高频 50kHz，即提高 1000 倍，则从理论上讲，变压器所需截面积可以缩小 1000 倍。

在图 1-3 中，交流电直接经过输入滤波、不控（二极管）整流电路和电容滤波后得到直流电压，该直流电压由逆变电路逆变成高频交流方波脉冲电压，经高频变压器 T 隔离并变成适当的交流电压，再经输出整流与滤波电路转换成所需的直流

电压输出。当输入交流电压或负载等变化时，直流输出电压也会变化的趋势，这时可调节逆变电路输出的方波脉冲电压的时间比例，从而使直流输出电压保持稳定。通过图 1-3 可以看出，逆变电路是高频开关电源的核心。另外，由于人耳可听到的音频的范围大体上为 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ ，因此当逆变电路的开关频率选择在 20kHz 以上时，就可避免产生令人烦躁的噪声。

图 1-3 所示的高频开关电源电路结构与图 1-1 所示的线性电源的电路结构相比，看起来变得更加复杂了，但却由此带来了几个突出的优点。首先，该电路中起调节输出作用的逆变电路中的电力电子器件都工作在开关状态，损耗较小，使得电源的效率可达到 90% 以上，甚至更高。其次，电路中起隔离和电压变换作用的变压器 T 不是工频变压器，而是高频变压器，其工作频率多为 20kHz 以上。因此高频变压器的体积可做得较小，从而使整个电源的体积大为缩小，重量也大大减轻（原因前已述及）。当然，由于工作频率高，滤波器体积也大为减小。正是由于在图 1-3 中的功率器件总是工作在开关状态，所以人们习惯称之为“开关电源”，这就是“开关电源”这一称谓产生的背景。

上述由线性电源发展演变而来的高频开关电源，由于有高频变压器隔离，因而属于隔离型开关电源。还有一种没有变压器的电源，也属于开关电源的范畴。图 1-4 就是一种典型的非隔离型开关电源电路，它实际上是一个降压斩波电路，其控制和调整输出电压方式与隔离型开关电源完全相同。这类非隔离型开关电源电路，还有升压型、升降压型等多种非隔离型开关电源电路（详见第 4 章非隔离型直流变换器部分）。

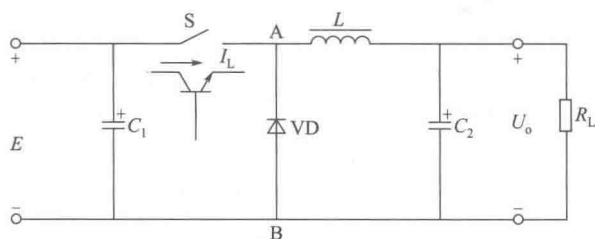


图 1-4 非隔离降压型开关电源电路

另外，还有一类常见的直流电源，就是如图 1-5 所示的由晶闸管为功率元件的相位控制电源，简称相控电源。它一般由变压器、整流电路、滤波电路和控制电路等组成。交流电经变压器变压隔离、全控整流电路整流、无源滤波器滤波变换成直流电输出。当输入的交流电或负载电流变化引起输出不稳定时，控制电路适时改变晶闸管的触发脉冲相位，使晶闸管的导通角发生变化，从而使输出量保持稳定。图 1-5 所给出的是单相桥式全控（晶闸管）整流电路，就该电路而言，其输出电压除直流分量外，所含有交流分量的最低频率为 100Hz ，如果改为如图 1-6 所示的三相桥式全控（晶闸管）整流电路，输出电压所含有交流分量的最低频率则为 300Hz 。但不论哪一种形式的全控整流电路，其功率器件——晶闸管的开关频率都是工频。它与高频开关电源相比，具有主电路结构简单、控制方便的优点以及体积大、瞬态