

基础篇

零起点

学开关电源设计

◆ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

基础篇

零起点

学开关电源设计

◆ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

内 容 简 介

本书以高频开关电源设计与应用基础知识为主线,全面系统地阐述了高频开关电源设计与应用的最新技术。全书共5章,在简要介绍国内外高频开关电源技术发展的基础上,重点讲述了开关电源中的电子元件、开关电源变压器、开关电源基础电路设计、开关电源控制方式及集成控制器等内容。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值,是从事高频开关电源设计与应用的工程技术人员人员的必备读物。

本书可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事高频开关电源设计、开发和应用的工程技术人员阅读,也可供高等院校、职业技术学院相关专业的师生参考。

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

零起点学开关电源设计. 基础篇 / 周志敏, 纪爱华编著. —北京: 电子工业出版社, 2013. 1
ISBN 978 - 7 - 121 - 19026 - 1

I. ①零… II. ①周…②纪… III. ①开关电源 - 设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 278223 号

策划编辑: 富 军

责任编辑: 刘真平

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 16.5 字数: 422.4 千字

印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 45.00 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 zlls@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

随着电子技术的快速发展，电子系统的应用领域越来越广泛，电子设备的种类也越来越多。而电子设备都离不开可靠的电源，电源性能的优劣直接关系到整个电子系统的安全性和可靠性。电子设备的小型化和低成本化使电源以轻、薄、小和高效率为主要发展方向，对电源的要求更加灵活多样。开关频率的持续提高使开关电源的性能得以进一步优化，集成度更高，功耗更低，电路更加简单，工作更加可靠。

目前，我国通信、信息、家电、国防等领域的电子设备普遍采用高频开关电源，高频开关电源的开发、研制和生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。在全球倡导节能环保、提高能效的背景下，高频开关电源的设计正面临着前所未有的挑战。为此，本书结合国内外高频开关电源技术的发展动向，系统地介绍了在高频开关电源设计中应掌握的电子元件特性、电子变压器、基本电路和高频开关电源控制技术、高频开关电源集成控制器等内容。本书将高频开关电源基础理论知识、典型电路、设计方法融于一体，力求做到通俗易懂和结合实际，是从事高频开关电源设计、开发和应用的工程技术人员的必备参考书。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平等。本书在写作过程中，无论从资料的收集还是在技术信息交流上，都得到了国内外的专业学者和同行及开关电源制造商的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间短，水平有限，难免有错误之处，敬请读者批评指正。

编 著 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 开关电源基础知识	1
1.1.1 开关电源构成与分类	1
1.1.2 开关电源常用的变换器电路类型	11
1.2 开关电源技术的发展动向	16
1.2.1 开关电源技术发展及关注点	16
1.2.2 开关电源的发展趋势	21
1.2.3 国外开关电源的技术动态	29
第 2 章 开关电源中的电子元件	35
2.1 常用电子元件	35
2.1.1 电阻器	35
2.1.2 电容器	44
2.1.3 电感器	53
2.1.4 软磁铁氧体磁芯及铁氧体磁珠	58
2.2 半导体器件	64
2.2.1 二极管	64
2.2.2 三极管	71
2.2.3 功率场效应晶体管	74
2.2.4 绝缘栅双极晶体管	79
2.3 光电耦合器	87
第 3 章 开关电源变压器	93
3.1 开关电源变压器特性及设计方法	93
3.1.1 开关电源对开关变压器的要求	93
3.1.2 开关电源变压器的特性	95
3.1.3 开关电源变压器的设计方法	97
3.2 扁平式变压器的设计原理及其应用	103
3.2.1 扁平式变压器的结构及设计原理	104
3.2.2 扁平式变压器的应用	109
3.3 高频低造型电源变压器	110
3.3.1 高频低造型电源变压器原理	110
3.3.2 高频低造型变压器设计	113
3.4 超微晶开关变压器的设计	116
3.4.1 变压器的性能指标及电路形式	116

3.4.2	主要参数的确定	119
3.5	电力电子高频磁技术及开关变压器发展趋势	120
3.5.1	电力电子高频磁技术研究的意义及发展趋势	120
3.5.2	开关变压器的最新发展	124
第4章	开关电源基础电路设计	129
4.1	开关电源输入 EMI 滤波器及浪涌抑制电路	129
4.1.1	开关电源 EMI 滤波器	129
4.1.2	开关电源 EMI 滤波器选择	139
4.1.3	开关电源中浪涌电流抑制电路	143
4.2	开关电源整流技术	149
4.2.1	倍流整流技术	149
4.2.2	同步整流技术	153
4.3	开关电源电压基准的特性及选用	158
4.3.1	电压基准的分类及技术参数	159
4.3.2	电压基准的类型	160
4.3.3	电压基准的选用	166
4.4	开关电源电流检测电路及无损吸收网络	169
4.4.1	开关电源电流检测电路	169
4.4.2	无损吸收网络	173
第5章	开关电源控制方式及集成控制器	179
5.1	开关电源控制方式	179
5.1.1	开关电源基本控制电路	179
5.1.2	PWM 反馈控制模式	181
5.1.3	电流型控制模式中的斜波补偿	187
5.1.4	准固定频率滞环 PWM 电流控制方法	192
5.2	开关电源主电路结构及控制方式	194
5.2.1	开关电源主电路结构	194
5.2.2	改进型 DC/DC 变换器拓扑结构	198
5.3	高频开关电源 PWM 控制器	214
5.3.1	FA5310/FA5311 集成控制器	214
5.3.2	HIP6004E 集成控制器	217
5.3.3	M51995A 集成控制器	222
5.3.4	MAX5003 集成控制器	227
5.3.5	TEA1504 电流模式的 PWM 控制器	231
5.3.6	UC3842 电流型控制器	235
5.3.7	UC3843 集成控制器	237
5.3.8	UC3846 电流控制型脉宽控制器	240
5.3.9	TL494 电流模式的 PWM 控制器	243
5.3.10	UCC3960 初级启动控制器	246
5.3.11	STSR3 同步整流控制器	248
参考文献		255

第1章 概述



1.1 开关电源基础知识

1.1.1 开关电源构成与分类

1. 开关电源发展历程



电源技术

电源技术是一种应用功率半导体器件,综合电力变换技术、现代电子技术、自动控制技术的多学科的边缘交叉技术。随着科学技术的发展,电源技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关。目前电源技术已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。

电源技术对现代通信、电子仪器、计算机、工业自动化、电力工程、国防及某些高新技术,提供高质量、高效率、高可靠性的电源起着关键作用。

当代许多高新技术均与市电的电压、电流、频率、相位和波形等基本参数的变换和控制相关,电源技术能够实现对这些参数的精确控制和高效率的处理,特别是能够实现大功率电能的频率变换,从而为多项高新技术的发展提供有力的支持。因此,电源技术不但本身是一项高新技术,而且还是其他多项高新技术的发展基础。电源技术及其产业的进一步发展必将为大幅度节约电能、降低材料消耗以及提高生产效率提供重要的手段,并为现代生产和现代生活带来深远的影响。

电源技术如今已是非常重要的基础科技,从日常生活到最尖端的科技,都离不开电源技术的参与和支持,电源技术也正是在这种环境中一步步发展起来的。

开关电源是近年来应用非常广泛的一种电源,它具有体积小、重量轻、耗能低、使用方便等优点,在各类电子产品中得到广泛的应用。但由于开关电源的控制电路比较复杂,输出纹波电压较高,所以开关电源的应用也受到一定的限制。

1955年美国罗耶(GH. Roger)发明的自激振荡推挽晶体管单变压器直流变换器,是实现高频转换控制电路的开端,1957年美国查赛(Jen Sen)发明了自激式推挽双变压器,1964年美国开关电源科学家们提出取消工频变压器的串联开关电源的设想,这对电源在体积和重量方面的下降提供了一条根本的途径。到了1969年,由于大功率硅晶体管的耐压提高,二极管反向恢复时间的缩短等元件改善,研制出25kHz的开关电源。

20世纪60年代,开关电源的问世,使其逐步取代了线性稳压电源和SCR相控电源。自20世纪80年代开始,高频化和软开关技术的开发研究,使功率变换器性能更好、重量

更轻、尺寸更小。高频化和软开关技术是过去 20 年国际电力电子界研究的热点之一。自 20 世纪 90 年代末期同步整流技术诞生以来，开关电源技术得到了极大的发展，采用 IC 控制技术的同步整流方案已被开关电源研发工程师普遍接受，现在的同步整流技术都在努力实现 ZVS、ZCS 方式的同步整流。

开关电源问世 60 多年来，开关电源技术有了飞速发展和变化，经历了功率半导体器件、高频化和软开关技术、开关电源系统的集成技术三个发展阶段。

在非对称的开关电源电路拓扑中，特别是对于性能良好的正激电路或正激有源钳位电路，在二次侧的同步整流中，为了实现 ZVS 方式的同步整流，消除 MOSFET 体二极管的导通损耗和反向恢复时间带来的损耗，TI 公司的专利技术“预检测栅驱动技术”在控制芯片中增加了大量的数字控制技术，正激电路同步整流控制芯片 UCC27228 的诞生使正激电路的效率达到了前所未有的高效率。再配合好初级侧的有源钳位技术之后，使这种最新的电路模式既做到了初级侧的软开关 ZVS 方式工作，又解决了磁芯复位及能量回馈，减轻了功率 MOSFET 的电压应力，还做到了二次侧的 ZVS 最佳状态的同步整流，综合使用这两项技术的中小功率的 DC/DC 变换器，其效率都在 94% 以上，功率密度也都能达到 200W/in 以上。



发
展

近 20 多年来，开关电源沿着下述两个方向不断发展。

第一个方向是对开关电源的核心单元控制电路实现集成化，1997 年国外首先研制成脉宽调制（PWM）控制器集成电路，美国摩托罗拉公司、硅通用公司（Silicon General）、尤尼特德公司（Unitrode）等相继推出一批 PWM 芯片，典型产品有 MC3520、SG3524、UC3842。20 世纪 90 年代以来，国外又研制出开关频率达 1MHz 的高速 PWM、PFM（脉冲频率调制）芯片，典型产品如 UC1825、UC1864。

第二个方向则是对中小功率开关电源实现单片集成化。这大致分两个阶段：20 世纪 80 年代初，意-法半导体有限公司（SGS-Thomson）率先推出 L4960 系列单片开关式稳压器。该公司于 20 世纪 90 年代又推出了 L4970A 系列。其特点是将脉宽调制器、功率输出级、保护电路等集成在一个芯片中，使用时需配置上工频变压器与电网隔离，适用于制作低压输出（5.1~40V）、大中功率（400W 以下）、大电流（1.5~10A）、高效率（可达到 90% 以上）的开关电源。

开关电源是使用现代电力电子技术，采用功率半导体器件作为开关，经过控制开关晶体管导通和关断的比率（占空比），调整输出电压，维持输出稳定的一种电源。早在 20 世纪 80 年代，计算机电源完成了开关电源化，率先完成计算机电源换代；进入 20 世纪 90 年代，开关电源已普遍使用在各种电子、电气设备，程控交流机、通信、电力检测设备电源和控制设备电源之中。开关电源普遍由脉冲宽度调制（PWM）控制 IC 和 MOSFET 构成。开关电源和线性电源相比，两者的成本都随着输出功率的增加而增长，但两者增长速率各异。线性电源成本在某一输出功率点上，反而高于开关电源，这一点称为成本反转点。随着电力电子技术的发展和创新，使得开关电源技术也不时地创新，这一成本反转点日益向低输出电力端移动，从而为开关电源提供广大的展开空间。

目前市场上开关电源中功率开关管多采用双极型晶体管，开关频率可达几十 kHz；采用 MOSFET 的开关电源转换频率可达几百 kHz。为提高开关频率必须采用高速开关器件，

对于兆赫兹以上开关频率的电源可利用谐振电路,这种工作方式称为谐振开关方式。它可以极大地提高开关速度,原理上开关损耗为零,噪声也很小,这是提高开关电源工作频率的一种方式。目前,采用谐振开关方式的兆赫级变换器已经实用化。

2. 开关电源的技术性能

(1) 高可靠

开关电源比线性电源使用的元件数十倍,因此降低了可靠性。从寿命角度出发,电解电容、光耦合器及散热单元等器件的寿命决定着电源的寿命。追求寿命的延长要从设计方面着眼,而不是从使用方面着想。美国一公司通过降低给温,减少器件的电应力,降低运行电流等措施使其 DC/DC 开关电源系列产品的可靠性大大提高,产品的 MTBF 高达 100 万小时以上。

(2) 模块化

无论 AC/DC 还是 DC/DC 变换器都朝模块化方向发展,其特点是可以由模块电源组成分布式电源系统;可以设计成 $N+1$ 冗余电源系统,从而提高可行性;可以做成插入式,实现热更换,从而在运行中出现故障时能高速更换模块插件;多个模块并联可实现大功率电源系统。此外,还可以在电源系统建成后,根据发展需要不断扩充容量。

(3) 低噪声

开关电源的一大缺点是噪声大,单纯追求高频化,噪声也随之增大,采用部分谐振转换回路技术,在原理上既可以高频化,又可以低噪声。但谐振转换技术也有其难点,如很难准确地控制开关频率,谐振时增大了器件负荷,场效应管的寄生电容容易引起短路损耗,元件热应力转向开关管等问题难以解决。日本把变压器设计成初次级分离阻燃密封,自身具备噪声抑制功能(共模无噪声隔离变压器),既节省了噪声滤波器,又减小了噪声。

(4) 抗电磁干扰(EMI)

当开关电源在高频下开关时,其噪声通过电源线对其他电子设备产生干扰,世界各国已有抗 EMI 的规范或标准,如美国的 FCC、德国的 VDE 等,研究开发抗 EMI 的开关电源日显重要。

(5) 电源系统管理和控制

应用微处理器或微机集中控制与管理,可以及时反映开关电源环境的各种变化,电源系统内的处理单元实现智能控制,可自动诊断故障,减少维护工作量,确保正常运行。

(6) 计算机辅助设计(CAD)

利用计算机对开关电源系统的稳定性、电路仿真、印制电路板、热传导、EMI 以及可靠性等进行 CAD 设计和模拟试验,十分有效,是最为快速经济的设计方法。

(7) 产品更新加快

目前的开关电源产品要求输入电压通用(适用世界各国电网电压规模),输出电压范围扩大(如计算机和 workstation 需要增加 3.3V 这一电压,程控需要增加 DC 150V 这一电压),输入端功率因数进一步提高(最有效的方法是加一级“有源功率因数校正器 APFC”),并具有安全、过压保护等功能。

3. 开关电源的基本构成



基本
结构

开关电源采用功率半导体器件作为开关器件，通过周期性间断工作，控制开关器件的占空比来调整输出电压。开关电源的基本构成如图 1-1 所示，其中 DC/DC 变换器进行功率转换，它是开关电源的核心部分，还有启动、过流与过压保护、噪声滤波等电路。输出采样电路（ R_1 、 R_2 ）检测输出电压变化，与基准电压 U_r 比较，误差电压经过放大及脉宽调制（PWM）电路，再经过驱动电路控制功率器件的占空比，从而达到调整输出电压大小的目的。

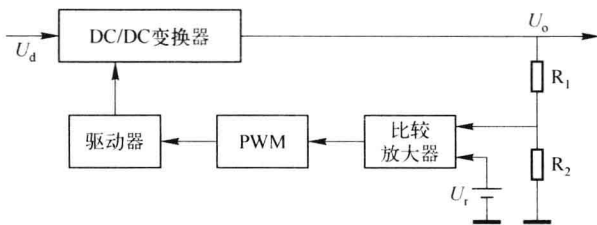


图 1-1 开关电源的基本构成

开关电源的核心部分 DC/DC 变换器有多种电路形式，常用的有工作波形为方波的 PWM 变换器以及工作波形为准正弦波的谐振型变换器。

相对线性稳压电源而言，开关电源是利用现代化电力电子技术，控制开关晶体管开通和关断的时间比率，维持稳定输出电压的一种电源。开关电源的输入端直接将交流电整流变成直流电，在高频振荡电路的作用下，用开关管控制电流的通断，形成高频脉冲电流。在电感（高频变压器）的帮助下，输出稳定的低压直流电。

开关电源中的开关管工作在截止区和饱和区。由于变压器的磁芯大小与开关管的工作频率的平方成反比，频率越高，铁芯越小。这样就可以大大减小变压器，使电源减轻重量和体积。而且由于它直接控制直流，使这种电源的效率比线性电源高很多。这样就节省了能源，因此它很受人们的青睐。

但是开关电源也有缺点，就是电路复杂，维修困难，对电路的污染严重，电源噪声大，不适用于某些低噪声电路。

对于串联线性稳压电源，输出对输入的瞬态响应特性主要由调整管的频率特性决定。但对于开关电源，输入的瞬态变化比较多地表现在输出端。提高开关频率的同时，由于反馈放大器的频率特性得到改善，开关电源的瞬态响应问题也能得到改善。负载变化瞬态响应主要由输出端 LC 滤波器特性决定，所以可以利用提高开关频率，降低输出滤波器 LC 体积的方法来改善瞬态响应特性。

4. 开关式电源的基本工作原理

开关电源通过电路控制开关管进行高速的导通与截止，将直流电转化为高频率的交流电提供给变压器进行变压，从而产生所需要的一组或多组电压。转化为高频交流电的原因是高频交流在变压器变压电路中的效率要比 50Hz 高很多，所以开关变压器可以做得很小，而且工作时不是很热，成本很低。简单地说，开关电源的工作原理是：

工作原理

- ① 交流电源输入经整流滤波成直流。
- ② 通过高频 PWM (脉冲宽度调制) 信号控制开关管工作, 以将直流加到开关变压器初级上。
- ③ 开关变压器次级感应出高频电压, 经整流滤波供给负载。
- ④ 输出部分通过一定的电路反馈给控制电路, 控制 PWM 占空比, 以达到稳定输出的目的。

交流电源输入时一般要经过滤波器滤掉电网上的干扰, 同时也过滤掉开关电源对电网的干扰; 在功率相同时, 开关频率越高, 开关变压器的体积就越小, 但对开关管的要求就越高; 开关变压器的次级可以有多个绕组或一个绕组有多个抽头, 以得到需要的输出; 一般还应该增加一些保护电路, 比如空载、短路等保护, 以提高开关电源工作的可靠性。

开关电源按控制方式分为调宽式和调频式两种, 在实际应用中, 调宽式使用得较多, 在目前开发和使用的开关电源集成电路中, 绝大多数为脉宽调制型。调宽式开关电源的基本原理如图 1-2 所示。

高频电子开关是电能转换的主要手段和方法, 在一个电子开关周期 (T) 内, 电子开关的接通时间 t_{on} 与一个电子周期所占时间之比, 叫接通占空比 (D), $D = t_{on}/T$ 。

断开时间 t_{off} 所占 T 的比例称为断开占空比 (D'), $D' = t_{off}/T$ 。开关周期是开关频率的倒数, $T = 1/f$ 。例如, 一个开关电源的工作频率是 50kHz , 它的周期 $T = 1/(50 \times 10^3) = 20\mu\text{s}$ (微秒)。很明显, 接通占空比 (D) 越大, 负载上的电压越高, 表明电子开关接通时间越长, 此时负载感应电压较高, 工作频率也较高。这对于开关电源的高频变压器实现小型化有帮助, 同时, 能量传递的速度也快。但是, 开关电源中开关功率管、高频变压器、控制集成电路以及输入整流二极管的发热量高, 损耗大。对于不同的变换器形式, 所选用的占空比大小是不一样的。

对于单极性矩形脉冲来说, 其直流平均电压 U_0 取决于矩形脉冲的宽度, 脉冲越宽, 其直流平均电压值就越高。直流平均电压 U_0 可由以下公式计算

$$U_0 = U_m \times T_1 / T \quad (1-1)$$

式中, U_m 为矩形脉冲最大电压值; T 为矩形脉冲周期; T_1 为矩形脉冲宽度。

从式 (1-1) 可以看出, 当 U_m 与 T 不变时, 直流平均电压 U_0 将与脉冲宽度 T_1 成正比。这样, 只要设法使脉冲宽度随输出电压的增高而变窄, 就可以达到稳定电压的目的。

控制电路

开关式稳压电源的基本电路框图如图 1-3 所示, 交流电压经整流电路及滤波电路整流滤波后, 变成含有一定脉动成分的直流电压, 该电压进入高频变换器被转换成所需电压值的方波, 最后再将这个方波电压经整流滤波变为所需要的直流电压。

控制电路为一脉冲宽度调制器, 它主要由取样器、比较器、振荡器、脉宽调制及基准电压等电路构成。这部分电路目前已集成化, 具有适用于各种开关电源应用的系列产品。控制电路用来调整高频开关元件的开关时间比例,

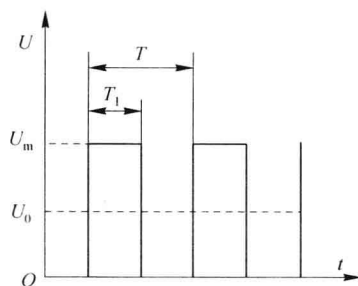


图 1-2 调宽式开关电源的基本原理

以达到稳定输出电压的目的。

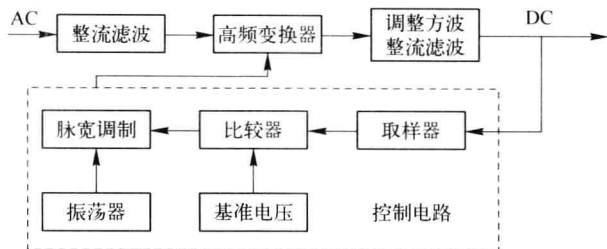


图 1-3 开关式稳压电源的基本电路框图

(1) 开关电源的优点

① 功耗小，效率高。在开关电源电路中，在激励信号的激励下，开关管交替地工作在导通 - 截止和截止 - 导通的开关状态，转换速度很快，工作频率一般为 50kHz 左右，在一些技术先进的国家，可以做到几百或者近 1 000kHz。这使得开关管的功耗很小，电源的效率可以大幅度地提高，其效率一般可以达到 85%，质量好的可以达到 95% 甚至更高，美国一般家用电器和工业电气设备的单机能源消耗指数大于 92%。美国的“能源之星”对电子镇流器、开关电源以及家用电器的效率都制定有很仔细的、非常严格的规章条款。

② 体积小，重量轻。从开关电源的原理框图可以清楚地看到没有采用笨重的工频变压器，由于开关管上的耗散功率大幅度降低后，又省去了较大的散热片。由于这两方面原因，使开关电源实现了体积小，重量轻。据统计，100W 的铁芯变压器的重量为 1 200g 左右，体积达 350cm³，而 100W 的开关电源的重量只有 250g，敞开式的电源更轻，体积不到铁芯变压器的 1/4。

③ 稳压范围宽。改变输出电流、电压比较容易，且稳定、可控。开关电源的输出电压是由激励信号来调节的，输入信号电压的变化可以通过调频或调宽来进行补偿。这样，在工频电网电压变化较大时，它仍能够保证有较稳定的输出电压。所以开关电源的稳压范围很宽，稳压效果很好。此外，改变占空比的方法有脉宽调制型和频率调制型两种。这样，开关电源不仅具有稳压范围宽的优点，而且实现稳压的方法也较多，设计人员可以根据实际应用的要求，灵活地选用各种类型的开关电源。

④ 滤波的效率大为提高，使滤波电容的容量和体积大为减小。开关电源的工作频率目前基本上是在 50kHz，是线性稳压电源的 1 000 倍，这使整流后的滤波效率几乎也提高了 1 000 倍。就是采用半波整流后加电容滤波，效率也提高了 500 倍。在相同的纹波输出电压下，采用开关电源时，滤波电容的容量只是线性稳压电源中滤波电容的 1/500 ~ 1/1 000。

⑤ 开关电源具有各种保护功能，提高了开关电源工作的可靠性。

⑥ 电路形式灵活多样。开关电源的形式有自激式和他激式，有调宽型和调频型，有单端式和双端式等，设计人员可以发挥各种类型电路的特长，设计出能满足不同应用场合的开关电源。

(2) 开关电源的缺点

开关电源的缺点是存在较为严重的开关干扰，在开关电源中，功率开关管工作在开关状态，在其开关过程中产生的交流电压和电流通过电路中的其他元件产生尖峰干扰和谐振干扰。这些干扰如果不采取一定的措施进行抑制、消除和屏蔽，就会严重地影响整个系统

的正常工作。此外,由于开关电源振荡器没有工频变压器隔离,这些干扰就会串入工频电网,使附近的其他电子仪器、设备和控制设备受到严重的干扰。

目前,由于国内微电子技术、阻容器件生产技术以及磁性材料技术与一些技术先进国家还有一定的差距,因而开关电源的造价不能进一步降低,也影响到可靠性的进一步提高。所以在我国的电子仪器以及机电一体化仪器中,开关电源还不能得到十分广泛的普及应用。特别是对于无工频变压器开关电源中的高压电解电容器、高反压大功率开关管、开关变压器的磁芯材料等器件,我国还处于研究、开发阶段。在一些技术先进国家,开关电源虽然有了一定的发展,但在实际应用中还存在一些问题,不能十分令人满意。这暴露出开关电源的又一个缺点,那就是电路结构复杂,故障率高,维修麻烦。对此,如果设计中和制造中不予以充分重视,则它将直接影响到开关电源的推广应用。当今,开关电源推广应用比较困难的主要原因就是它的制作技术难度大、维修麻烦和造价成本较高。

(3) 开关电源发展中存在的问题

客观上讲,开关电源的发展是非常快的,这是因为它具有其他电源所无法比拟的优势。材料之新、用途之广,是它快速发展的主要动力。但是,它离人们的要求、应用的价值还差得很远,体积、重量、效率、抗干扰能力、电磁兼容性以及使用的安全性都不能说是十分完美。目前需要解决的问题有:



存
在
问
题

① 器件问题。开关电源的控制集成度不高,这就影响了开关电源的稳定性和可靠性,同时对开关电源的体积和效率来说也是一个大问题。

② 材料问题。开关电源使用的磁芯、电解电容及整流二极管都很笨重,也是耗能的主要根源。

③ 能源变换问题。按照习惯,变换有这样几种形式:AC/DC变换、DC/AC变换以及DC/DC变换等,实现这些变换都是以频率为基础,以改变电压为目的,工艺复杂,控制难度大,始终难以形成大规模生产。

④ 软件问题。开关电源的软件开发目前只是刚刚起步,例如软开关,虽然它的损耗低,但难以实现高频化和小型化。要做到“软开关”并实程序化,更有一定的困难。要真正做到功率转换,功率因数改善,全程自动检测控制实现软件操作,目前还存在很大的差距。

⑤ 生产工艺问题。往往在试验室中能达到相关的技术标准,但在生产上会出现各种问题。这些问题大多是焊接问题和元件技术性能问题,还有生产工艺上的检测、老化、黏结、环境等方面的因素。

5. 开关电源的分类

现在,电子技术和应用迅速发展,对电子仪器和设备的要求是:性能上更加安全可靠,在功能上不断地增加;在使用上自动化程度越来越高;在体积上要日趋小型化。这使采用具有众多优点的开关电源就显得更加重要了。所以,开关电源在计算机、通信、航天、家电等方面都得到了越来越广泛的应用,发挥了巨大的作用,这大大促进了开关电源的发展,从事这方面研究和生产的人员也在不断地增加,开关电源的品种和类型也越来越多。图1-4给出了各种类型开关电源的原理图。目前开关电源的拓扑结构可分为以下几类。

(1) 按激励方式分类



广泛应用

① 他激式开关电源。他激式开关电源完全依赖于外部维持振荡，电路中设有激励信号振荡器，电路形式如图 1-4 (e) 所示。在实际应用中他激式应用比较广泛。根据激励信号结构分类：可分为脉冲调宽和脉冲调幅两种，脉冲调宽是控制信号的宽度，也就是频率；脉冲调幅是控制信号的幅度，两者的作用相同，都是使振荡频率维持在某一范围内，达到稳定电压的效果。变压器的绕组一般可以分成三种类型，一组是参与振荡的初级绕组，一组是维持振荡的反馈绕组，还有一组是负载绕组。负载绕组在提供电能的同时，也肩负起稳定电压的功能，其原理是在电压输出电路接一个电压取样装置，监测输出电压的变化情况，及时反馈给振荡电路调整振荡频率，从而达到稳定电压的目的。为了避免干扰，反馈回振荡电路的电压采用光电耦合器隔离。

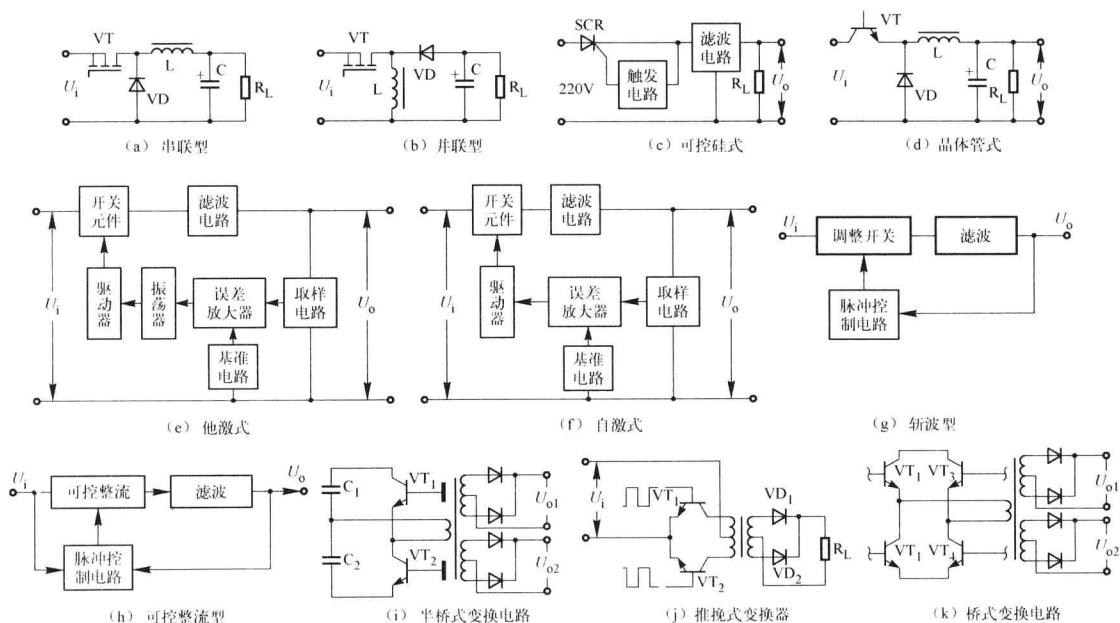


图 1-4 各种类型开关电源的原理图

② 自激式开关电源。无须外加信号源能自行振荡，自激式完全可以把它看做一个变压器反馈式振荡电路。开关管兼做振荡器中的振荡管，电路形式如图 1-4 (f) 所示。

(2) 按调制方式分类



调制方式

① 脉宽调制型开关电源。振荡频率保持不变，通过改变脉冲宽度来改变和调节输出电压的大小，有时通过取样电路、耦合电路等构成反馈闭环回路，来稳定输出电压的幅度。

② 频率调制型开关电源。占空比保持不变，通过改变振荡器的振荡频率来调节和稳定输出电压的幅度。

③ 混合调制型开关电源。通过调节导通时间的振荡频率来完成调节和稳定输出电压的幅度。

(3) 按开关管电流的工作方式分类

① 开关型开关电源。用开关管把直流变成高频标准方波，电路形式类似于他激式。

② 谐振型开关电源。开关管与 LC 谐振回路将直流变成准正弦波，电路形式类似于自激式。

(4) 按开关管的类型分类

① 晶体管式开关电源。采用晶体管作为开关管，电路形式如图 1-4 (d) 所示。

② 可控硅式开关电源。采用可控硅作为开关管，这种电路的特点是直接输入交流电，不需要一次整流部分，其电路形式如图 1-4 (c) 所示。

(5) 按储能电感与负载的连接方式分类

① 串联型开关电源。储能电感串联在输入与输出电压之间，电路形式如图 1-4 (a) 所示。

② 并联型开关电源。储能电感并联在输入与输出电压之间，电路形式如图 1-4 (b) 所示。

(6) 按开关管的连接方式分类

① 单端式开关电源。电路中仅使用一个开关管，这种电路的特点是价格低，电路结构简单，但输出功率不高，其电路形式如图 1-4 (a), (b), (d) 所示。

② 推挽式开关电源。电路中使用两个开关管，将其连接成推挽功率放大器形式。这种电路的特点是开关变压器必须具有中心抽头，电路形式如图 1-4 (j) 所示。

③ 半桥式开关电源。电路中使用两个开关管，将其连接成半桥形式。它的特点是适应于输入电压较高的场合。电路形式如图 1-4 (i) 所示。

④ 全桥式开关电源。电路中使用四个开关管，将其连接成全桥形式。它的特点是输出的功率比较大。其电路形式如图 1-4 (k) 所示。

(7) 按输入与输出的电压大小分类

① 升压式开关电源。输出电压比输入电压高，实际就是并联型开关电源。

② 降压式开关电源。输出电压比输入电压低，实际就是串联型开关电源。

(8) 按工作方式分类

① 可控整流型开关电源。所谓可控整流型开关电源，是指采用可控硅整流元件作为调整开关管，可由交流市电电网直接供电，也可用变压器变压后供电。（这种供电方式在开关电源刚兴起的初期常常采用，目前基本上不采用。）在可工作的半波内，截去正弦曲线的前一部分，这一部分所占角度称为截止角，导通的正弦曲线的后一部分称为导通角。依靠调节导通角的大小，可达到调整输出电压和稳定电压的目的。其电路如图 1-4 (h) 所示。

② 斩波型开关电源。斩波型开关电源是指采用直流供电，输入直流电压加到开关电路上，在开关电路的输出端得到单向的脉动直流，经过滤波得到与输入电压不同的稳定直流电压，电路还从输出电压取样，经过比较、放大、控制脉冲发生电路产生的脉冲信号，用以控制调整开关的导通时间和截止时间的长短或开关的工作频率，最后达到稳定输出电压的目的。电路的过压保护电路也是依据这一部分提供的取样信号来进行工作的，斩波型电路形式如图 1-4 (g) 所示。

③ 隔离型开关电源。这种形式的开关电源是在输入回路与逆变电路之间，经过高频变

压器（也可称为开关变压器），利用磁场的变化实现能量的传递，没有电流间的直接流通。隔离型开关电源采用直流供电，经过开关电路，将直流电变成频率很高的交流电，再经变压器隔离、变压（升压或降压），然后经整流器整流，最后就可以得到极性和幅值各不相同的多组直流输出电压。电路从输出端取样，经放大后反馈至开关控制端，控制驱动电路的工作，最后达到稳定输出电压的目的。这种形式的开关电源在实际稳压电源中应用最为广泛。

（9）按电路结构分类

① 散件式开关电源。整个开关电源电路都是采用分立元件组成的，它的电路结构较为复杂，可靠性较差。

② 集成电路式开关电源。整个开关电源电路或电路的一部分是由集成电路组成的，这种集成电路通常为厚膜电路。有的厚膜集成电路中包括开关管，有的则不包括开关管。这种开关电源的特点是电路结构简单、调试方便、可靠性高。

（10）按工作性质分类



按工作性质大体上可分为“硬开关”和“软开关”两种。所谓硬开关，是指电子脉冲、外加控制信号强行对电子开关进行“开”和“关”，而与电子开关自身流过的电流以及两端施加的电压无关。显然，开关在导通和关断期间是有电流、电压存在的，因此，这种工作方式是有损耗的。但是它比其他变换电源的形式简单得多，所以，硬开关在很多地方仍然在应用，如脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）器就属于硬开关。目前，很多开关电源都用 PWM 来控制。

软开关是在零电压下导通，在零电流下关断的。可见，开关是在“零状态”下工作的，所以，理论上它的损耗为零，对浪涌电压、脉冲尖峰电压的抑制能力很大，其工作频率可以提高到 5MHz 以上，开关电源的重量和体积则可进行更大的改变。为了实现零电压“开”和零电流“关”，常采用谐振的方法。

从电子理论可知，谐振就是容抗等于感抗，总的电抗为零，电路中的电流无穷大。如果正弦波电压加到并联的电感回路上，这时电感上的电压就无穷大。利用谐振电路可实现正弦波振荡，当振荡到零时，电子开关导通，称为零电压导通（Zero Voltage Switching）。同样，流过电子开关的电流振荡到零时，电子开关关断，称为零电流关断（Zero Current Switching）。

总之，电子开关具有零电压导通、零电流关断的外部条件，这种变换器称为准谐振变换器。它是在脉宽调制器上附加谐振网络而形成的，固定电子开关导通时间，通过调整振荡频率，最终使电路产生谐振，从而获得准谐振变换器的模式。准谐振变换器开关电源的输出电压不随输入电压的变化而变化，它的输出电流也不随用电负载的变化而变化，这种开关电源的主变换器依靠开关频率来稳定输出参数，称为调频开关电源。调频开关电源没有脉冲调制开关电源那么容易控制，再加上准谐振电路电压峰值高，开关所受到的应力大，目前还没有得到广泛应用。

以上阐述的开关电源的品种都是站在不同的角度，以开关电源不同特点而分类的。尽管各种电路的激励方法、输出直流电压的调节手段、储能电感的连接方式、开关管的种类以及串并联结构等各不相同，但是它们最后总可以归结为串联型开关电源和并联型开关电

源这两大类。

1.1.2 开关电源常用的变换器电路类型



拓
扑
结
构

开关电源变换器的拓扑结构是指能用于转换、控制和调节输入电压的功率开关元件和储能元件的不同配置。开关电源变换器拓扑结构可分为两种基本类型：非隔离型（在工作期间输入源和输出负载共用一个电流通路）和隔离型（能量转换是用一个相互耦合磁性元件变压器来实现的，而且从源到负载的耦合是借助于磁通而不是共同的电流回路）。变换器拓扑结构是根据系统造价、性能指标和输入/输出负载特性诸因素选定的。

1. 非隔离开关变换器

非隔离开关变换器有四种基本拓扑结构用于 DC/DC 变换器。

(1) 降压拓扑结构

降压式开关电源的典型电路如图 1-5 所示。当开关管 VT_1 导通时，二极管 VD_1 截止，输入的整流电压经 VT_1 和 L 向 C 充电，这一电流使电感 L 中的储能增加。当开关管 VT_1 截止时，电感 L 感应出左负右正的电压，经负载 R_L 和续流二极管 VD_1 释放电感 L 中存储的能量，维持输出直流电压不变，电路输出直流电压的高低由加在 VT_1 基极上的脉冲宽度确定。

这种电路使用元件少，它同下面介绍的另外两种电路一样，只需要利用电感、电容和二极管即可实现。降压变换器将输入电压变换成较低的稳定输出电压。输出电压 (U_o) 和输入电压 (U_i) 的关系为

$$U_o/U_i = \Delta (\text{占空因数}) \quad (1-2)$$

$$U_i > U_o \quad (1-3)$$

(2) 升压拓扑结构

升压式开关电源的稳压电路如图 1-6 所示。当开关管 VT_1 导通时，电感 L 储存能量。当开关管 VT_1 截止时，电感 L 感应出左负右正的电压，该电压叠加在输入电压上，经二极管 VD_1 向负载供电，使输出电压大于输入电压，即将输入电压变换成较高的稳定输出电压。输出电压和输入电压的关系为

$$U_o/U_i = 1/(1 - \Delta) \quad (1-4)$$

$$U_i < U_o \quad (1-5)$$

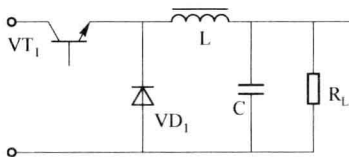


图 1-5 降压式开关电源

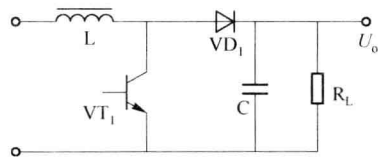


图 1-6 升压式开关电源

(3) 逆向拓扑结构

逆向变换器将输入电压变换成较低反相输出电压。输出电压与输入电压的关系为

$$U_o/U_i = -\Delta/(1 - \Delta) \quad (1-6)$$

$$U_i > U_o \quad (1-7)$$