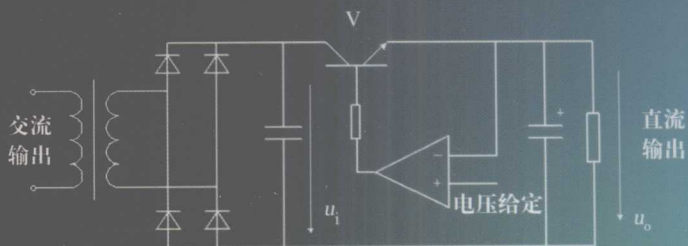


电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎裴云庆 杨旭 王兆安 编著

开关稳压电源 的设计和应用

KAIGUAN WENYA DIANYUAN
DE SHEJI HE YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

开关稳压电源的 设计及应用

裴云庆 杨 旭 王兆安 编著



机械工业出版社

本书是《电力电子新技术系列图书》中的一册，主要介绍开关稳压电源的基本原理、设计方法及应用。本书共分11章。第1章介绍了开关电源技术的一些基本概念及发展史和发展趋势。第2、3章分别介绍在开关电源中常用的电力电子变换电路的拓扑及工作原理。第4章介绍了PWM变换器的数学模型。第5、6章分别介绍开关电源中常用的电力电子器件和变压器、电感、电容器等元器件。第7、8章介绍开关电源中主电路及控制系统的设计方法。第9章介绍开关电源中常用的功率因数校正技术的基本原理。第10章介绍了开关电源的电磁兼容问题。第11章为开关电源的应用，介绍了两种小功率开关电源和两种大功率开关电源的设计过程。

本书可供从事开关电源开发、设计和生产的工程技术人员阅读，也可高校电力电子技术、电气自动化技术等专业师生提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

开关稳压电源的设计和应用/裴云庆等编著. —北京: 机械工业出版社, 2010. 5

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-30463-0

I. ①开… II. ①裴… III. ①开关电源: 稳压电源 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 071930 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: 孙流芳 责任编辑: 罗 莉

版式设计: 张世琴 责任校对: 李秋荣

封面设计: 马精明 责任印制: 齐 宇

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17 印张 · 328 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-30463-0

定价: 39.00 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

电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主任：王兆安

副主任：白继彬 牛新国 徐德鸿 杨 耕

委员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈 坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康 勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨 耕	杨 旭	余岳辉	张 波
张承慧	张为佐	张卫平	张 兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周 波	周锥维	查晓明

秘书组：陈守良 刘进军 孙流芳 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在20世纪80年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际，以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

本书是《电力电子新技术系列图书》中的一册，主要介绍开关稳压电源的基本原理、设计方法及应用。

开关稳压电源是在电子、通信、电气、能源、航空航天、军事以及家电等领域应用非常广泛的一种电力电子装置，以其内部的电力电子器件工作于高频开关状态而得名，其输出电压被控制为恒定或可调值，是目前电源的主要类型。通过改变其控制方式也可实现稳流输出。这两类电源通常简称为开关电源，它具有电能转换效率高、体积小、重量轻、控制精度高和快速性好等多方面的优点，在小功率范围内基本取代了线性调整电源，并迅速向中大功率范围推进，在很大程度上取代了晶闸管相控整流电源。可以说，开关电源技术是目前中小功率直流电能变换装置的主流技术。

根据应用领域和功率等级的不同，开关电源的电路结构种类繁多，控制方法灵活多样，新器件、新拓扑不断推出。在其工程设计中包括主电路、控制电路、传热、结构、电磁兼容等多方面的内容，因此开关电源的拓扑选型及设计工作较为繁琐，难度大。国内目前仍然以工程经验和仿制为主进行设计，其缺点是缺少深入的理论基础，不能根据具体的应用实现最合理的设计，往往造成设计裕量过大或不足，设计过程中对产品工作状况和实际性能的预见性较差，经常出现样机试制不成功而反复修改设计的情况，造成时间和经费的浪费。

究其原因，设计工作不是设计实例的简单模仿和设计资料的拼凑，而是在理解基本原理基础之上的再创造，因此应该在深入理解开关电源的电路、控制等问题的基本原理的基础之上，在设计原则的指导下，利用设计公式并遵循一定的设计方法进行设计。本书正是按照这一思路安排内容，并试图引导读者遵循这一步骤进行设计。希望能够藉此提高开关电源设计工作的正确性、合理性和规范性，提高设计的水平和质量，从而最终提高产品的质量，并且解决仿制带来的知识产权问题。

本书共分11章。第1章介绍了开关电源技术的一些基本概念及发展史和发展趋势。第2、3章分别介绍在开关电源中常用的电力电子变换电路的拓扑及工作原理。第4章介绍了PWM变换器的数学模型。第5、6章分别介绍开关电源中常用的电力电子器件和变压器、电感、电容等元器件。第7、8章介绍开关电源中主电路及控制系统的设计方法。第9章介绍开关电源中常用的功率因数校正技术的基本原理。第10章介绍了开关电源的电磁兼容问题。第11章为开关电

VI

源的应用,介绍了两种小功率开关电源和两种大功率开关电源的设计过程。

本书第1章由王兆安撰写,第2、3、5、6、7章和第11章中11.3、11.4节由裴云庆撰写,第4、8、9、10和第11章中11.1、11.2节由杨旭撰写。本书作者虽长期从事电力电子技术的教学和研究工作,但由于知识、经验和水平所限,书中一定存在不少疏漏和不足之处,有些观点也值得商榷,希望读者提出宝贵的批评和意见(联系地址:邮编710049西安交通大学电气工程学院裴云庆、杨旭 Tel: 029-82665223)。

作 者

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 关于开关稳压电源 1
- 1.2 开关电源的发展史 2
- 1.3 开关电源的应用 7
- 1.4 本书的基本结构 8
- 参考文献 9

第 2 章 PWM 开关电路拓扑 10

- 2.1 开关电源中电力电子电路的分类 10
- 2.2 非隔离型 DC-DC 变换电路 11
 - 2.2.1 降压 (Buck) 型电路 12
 - 2.2.2 升压 (Boost) 型电路 17
 - 2.2.3 升降压 (Buck-Boost) 型电路 22
 - 2.2.4 丘克 (Cuk) 型电路 25
 - 2.2.5 Sepic 型电路 27
 - 2.2.6 Zeta 型电路 28
- 2.3 隔离型电路 30
 - 2.3.1 正激型电路 30
 - 2.3.2 反激型电路 34
 - 2.3.3 半桥电路 36
 - 2.3.4 全桥型电路 40
 - 2.3.5 推挽型电路 43
- 2.4 整流电路 47
 - 2.4.1 全桥整流电路 47
 - 2.4.2 全波整流电路 48
 - 2.4.3 倍流整流电路 48
 - 2.4.4 同步整流技术 51
- 2.5 回馈型电路 53
 - 2.5.1 非隔离回馈型电路 53
 - 2.5.2 隔离回馈型电路 55

2.6 小结 56

参考文献 56

第 3 章 软开关技术 57

- 3.1 软开关的基本概念 57
 - 3.1.1 硬开关与软开关 57
 - 3.1.2 零电压开关与零电流开关 59
- 3.2 软开关电路的分类 59
 - 3.2.1 准谐振电路 59
 - 3.2.2 零电压开关 PWM 电路和零电流开关 PWM 电路 60
 - 3.2.3 零电压转换 PWM 电路和零电流转换 PWM 电路 61
- 3.3 典型的软开关电路 61
 - 3.3.1 零电压准谐振电路 61
 - 3.3.2 移相全桥型零电压开关 PWM 电路 64
 - 3.3.3 有源箝位正激型电路 68
 - 3.3.4 零电压转换 PWM 电路 71
 - 3.3.5 不对称半桥型电路 72
 - 3.3.6 软开关 PWM 三电平直流变换器 73
- 3.4 谐振变换电路的原理及分类 75
- 3.5 典型的谐振变换电路 76
 - 3.5.1 串联谐振电路 76
 - 3.5.2 并联谐振电路 78
 - 3.5.3 串并联谐振电路 81
- 3.6 小结 85
- 参考文献 85

第 4 章 开关电源控制系统的

原理 87

- 4.1 开关电路的建模 87
 - 4.1.1 理想开关模型 88

4.1.2 状态空间平均模型	89	6.1.1 电容器的主要参数	138
4.1.3 小信号模型	90	6.1.2 电解电容器	140
4.2 系统的传递函数	92	6.1.3 有机薄膜电容器	143
4.2.1 开关电路	92	6.1.4 瓷介电容器	143
4.2.2 PWM 比较器	96	6.2 电感及变压器	144
4.2.3 调节器	96	6.2.1 常用的软磁材料	144
4.3 基于小信号模型的分析方法	97	6.2.2 电感	148
4.3.1 系统的稳定性	97	6.2.3 变压器	152
4.3.2 动态指标	100	6.3 小结	155
4.4 电压模式控制和电流模式 控制	101	参考文献	156
4.4.1 电压模式控制	102	第 7 章 功率电路的设计	157
4.4.2 峰值电流模式控制	103	7.1 开关电源的主要技术指标及 分析	157
4.4.3 平均电流模式控制	108	7.1.1 输入参数	157
4.5 并网均流控制的原理	109	7.1.2 输出参数	158
4.6 小结	113	7.1.3 电磁兼容性指标	160
参考文献	113	7.1.4 其他指标	161
第 5 章 常用电力电子器件	115	7.2 主电路设计	162
5.1 二极管	115	7.2.1 主电路的选型	162
5.2 电力 MOSFET	119	7.2.2 硬开关与软开关电路的 选择	162
5.2.1 结构和工作原理	119	7.2.3 正激、推挽、半桥和全桥 型电路的主电路元器件参 数的计算	163
5.2.2 主要参数	122	7.2.4 反激型电路的主电路元器 件参数的确定	169
5.2.3 新型 MOSFET 器件简介	123	7.3 热设计和结构设计	172
5.3 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	124	7.3.1 开关元件的热设计	172
5.3.1 结构与工作原理	124	7.3.2 变压器和电抗器的热设 计	173
5.3.2 主要参数	126	7.3.3 机箱结构的设计	175
5.3.3 IGBT 的发展及新型结构 工艺简介	126	7.4 小结	175
5.4 MOSFET 及 IGBT 的驱动及 保护	128	参考文献	176
5.4.1 MOSFET 及 IGBT 的驱动	128	第 8 章 控制电路的设计	177
5.4.2 MOSFET 及 IGBT 的保护	132	8.1 电压模式控制电路的设计	177
5.5 功率模块与功率集成电路	134	8.1.1 电压调节器的结构形式	177
5.6 小结	136	8.1.2 电压调节器的参数	178
参考文献	137	8.2 峰值电流模式控制电路的	
第 6 章 无源器件	138		
6.1 常用电容器及选型	138		

设计	181	问题	224
8.3 平均电流模式控制电路的 设计	181	10.1 电磁兼容的基本概念	224
8.4 控制电路结构和主要组成部分 的原理	183	10.2 开关电路的 EMI 模型	225
8.5 典型的 PWM 控制电路	185	10.3 EMI 滤波器的设计	230
8.6 小结	198	10.4 抗干扰实验及抗干扰设计	233
参考文献	199	10.5 小结	235
第 9 章 功率因数校正技术	200	参考文献	235
9.1 谐波和功率因数的定义	200	第 11 章 开关电源设计实例	236
9.2 开关电源的功率因数校正 技术	203	11.1 90W 反激型电源适配器 设计	236
9.3 单相功率因数校正电路	204	11.1.1 技术指标	236
9.3.1 基本原理	204	11.1.2 输入 PFC 电路的设计	236
9.3.2 主电路参数计算	206	11.1.3 反激型电路的设计	241
9.3.3 单相功率因数校正的控 制电路	209	11.2 同步 Buck 型电路的设计	244
9.4 三相功率因数校正电路	212	11.2.1 技术指标	244
9.5 软开关功率因数电路	214	11.2.2 电感的设计	244
9.6 单级功率因数校正技术	215	11.2.3 MOSFET 的计算	245
9.6.1 单相单级功率因数变 换器	215	11.2.4 控制芯片的选择	245
9.6.2 三相单级功率因数变 换器	219	11.3 3kW 通信用开关电源设计	247
9.7 小结	221	11.3.1 技术要求	247
参考文献	222	11.3.2 主电路设计	247
第 10 章 开关电源的电磁兼容		11.3.3 控制电路的结构	253
		11.4 6kW 电力操作电源设计	254
		11.4.1 技术要求	254
		11.4.2 主电路设计	254
		11.5 小结	259
		参考文献	259

第 1 章 绪 论

1.1 关于开关稳压电源

在说明“开关稳压电源”（简称为开关电源）之前，首先对“电源”作一说明。

通常所说的电源可以分为直接电源和间接电源两大类。电源所输出的当然是电能。但是，自然界并没有可以直接利用的电源。雷电等自然现象虽然会产生出一定的电能，却难以作为电源来利用。因此，人类所使用的电源都是通过机械能、热能、化学能等转换而来的。本书把通过其他能源经过转换而得到的电源称为直接电源，比如发电机、电池等就是直接电源。在很多情况下，直接电源并不符合使用的要求，需要进行再一次变换。这次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和直流电之间的变换，也可以是电压或电流幅值的变换，或者是交流电的频率、相数等的变换。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他性能的改进。由于这种电源的输入也是电能，因此，本书把这种输入和输出都是电能的电源称之为间接电源。

人们接触最多的直接电源就是公用电网所提供的电源。无论是企事业单位，还是家庭，所使用的电能几乎都是直接或间接由电网提供的。电网电源来自发电厂，目前发电厂的发电方式主要有火力发电、水力发电、核能发电等几种形式。火力发电是把热能转变为电能，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热能再转换为电能。除水、火、核三大主要发电方式外，还有风力发电、太阳能发电等可再生能源发电方式。由公用电网所提供的电源都是工频交流电源。

人们日常接触的另一种直接电源是电化学电源。干电池、蓄电池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极小，但却与人们的关系越来越密切。虽然蓄电池和某些可充电干电池所贮存的化学能是靠电源的充电得到的，但因其利用（放电）时的电能是由化学能直接转变而来的，因此这些电源仍然属于直接电源。

除公用电网和电池所提供的电源外，对于从柴油发电机、风力发电机，以及从太阳电池得到的电源，这里也归为直接电源。

本书讲述的开关电源的输入和输出都是电能，因此它属于间接电源，是本

书的主要研究对象，而直接电源不属于本书研究的范畴。

开关电源电路是电力电子电路的一种。通常把电力分为交流（AC）、直流（DC）两大类。因此，基本的电力电子电路就可分为四大类型，即 AC-DC 电路，DC-AC 电路，AC-AC 电路，DC-DC 电路，见表 1-1。AC-DC 和 DC-AC 一般比较容易理解。对于 AC-AC 电路，可以变换的对象有频率、相数、电压和电流等。对于 DC-DC 电路，可以变换的主要对象是电压和电流。电力电子电路中的核心元器件是电力电子器件，它们一般都是工作在开关状态，这样可以使损耗很小，这是电力电子电路的一个显著特点。

表 1-1 电力电子电路的基本类型

输入 \ 输出	直流 (DC)	交流 (AC)
	交流 (AC)	整流
直流 (DC)	直流斩波	逆变

顾名思义，开关电源就是电路中的电力电子器件工作在开关状态的电源。这样一来，如果把由表 1-1 的四大类基本电力电子电路都看成电源电路，则所有的电力电子电路也都可以看成开关电源电路。而实际中，开关电源所涵盖的范围远比表中的范围要小得多，如整流电路中的相控电路就不属于开关电源范畴。

1.2 开关电源的发展史

在开关电源出现之前，线性稳压电源（简称线性电源）已经应用了很长一段时间。而后，开关电源是作为线性电源的一种替代物出现的，开关电源这一称谓也是相对于线性电源而产生的。图 1-1 是线性电源的结构简图。图中的关键元器件是调整管 V。工作时检测输出电压得到 u_o ，将其和参考电压 U_{ref} 进行比较，用其误差对调整管 V 的基极电流进行负反馈控制。这样，当输入电压 u_i 发生变化，或负载变化引起电源的输出电压 u_o 变化时，就可以通过改变调整管 V 的管压降 u_v 来使输出电压 u_o 稳定。为了使调整管 V 可以发挥足够的调节作用，V 必须工作在线性放大状态，且保持一定的管压降。因此，这种电源被称为线性电源。线性电源的直流输入电路通常是由工作在工频下的整流变压器 T 和二极管整流加电容滤波组成。由于交流电源电压变化范围有时较大，因此 u_i 的变化范围也较大。此外，二极管整流电路所接的滤波电容 C 不可能很大，这样 u_i 就有一定的脉动。但这些都可以通过调整管 V 的管压降来进行调整，使输出电压 u_o 的精度和纹波都满足较高的要求。

图 1-1 中整流变压器 T 的作用有两个：一是通过对其电压比的合理设计，使 u_i 比 u_o 高出一个合适的值，确保调整管 V 可工作在放大状态；二是使输出电压

和交流输入电源实现电气隔离，这一点也很重要。

图 1-1 的线性电源虽然可以满足所需直流电压的高低和供电质量（精度、纹波等）的要求，但有两个严重的缺点：一是调整管 V 工作在线性放大状态，损耗很大，因而使整个电源效率很低；二是需要一个工频变压器 T，使得电源体积大、重量重。

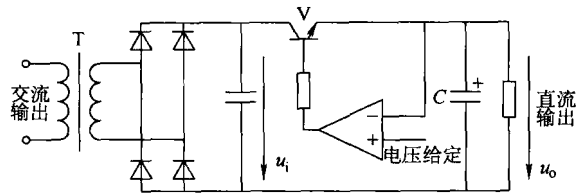


图 1-1 线性电源电路

开关电源就是为了克服线性电源的缺点而出现的，其典型结构见图 1-2。图 1-2 中的整流电路是把交流电源直接经过二极管整流电路和电容 C 滤波后得到直流电压 u_1 ，再由逆变器逆变成高频交流方波脉冲电压。由于人耳可听到的音频的范围大体为 20Hz ~ 20kHz，因此逆变器的开关频率大多选在 20kHz 以上，这样就避免了令人烦躁的噪声污染。逆变器输出经高频变压器 T 隔离，并变换成适当的交流电压，再经过整流和滤波变成所需要的直流输出电压 u_0 。

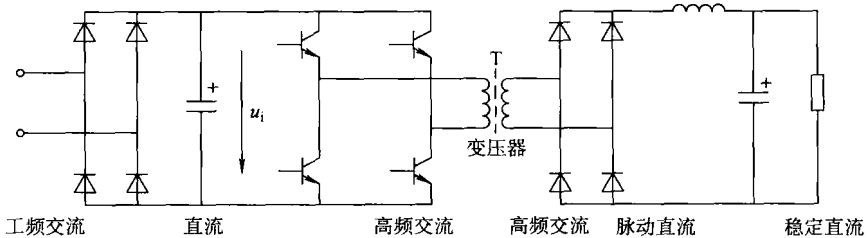


图 1-2 开关电源的典型结构

当交流输入电压、负载等变化时，直流输出电压 u_0 也会变化。这时可以调节逆变器输出的方波脉冲电压的宽度，使直流输出电压 u_0 保持稳定。从图 1-2 及开关电源的工作原理可以看出，逆变电路较为复杂，它是开关电源的核心部分。

上述电路结构看起来虽然比较复杂，但是比起图 1-1 的线性电源来，却有几个突出的特点。首先，该电路中起调节输出电压作用的逆变电路中的电力电子器件都工作在开关状态，损耗很小，使得电源的效率可达到 90% 甚至 95% 以上。其次，电路中起隔离和电压变换作用的变压器 T 是高频变压器，其工作频率多为 20kHz 以上。搬运过电子仪器的人都会有这样的体会，电子仪器往往“一头沉”，这较重的一头往往就是电源变压器所在的一头。因为高频变压器体积可以做得很小，从而使整个电源的体积大为缩小，重量也大大减轻。同时，由于工作频率高，滤波器的体积也大为减小。由于图 1-2 所示电源中的电力电子器件总

是工作在开关状态，因此相对于线性电源而言，称之为开关电源。

上述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，它是非隔离型的，也属于开关电源的范畴。图 1-3 就是一种典型的非隔离型开关电源电路。图中所画的实际上是一个降压斩波电路，通过调整输出脉冲电压的宽度（即调节开关器件 V 的导通占空比 D ）来调节输出电压。除图中的降压型电路外，还有升压型电路等多种非隔离型开关电源电路，相关内容将在 2.2 节中详述。

还有一大类常见的直流电源，就是图 1-4 所示的晶闸管相位控制电源（简称为相控电源）。图中所示的是单相全控桥式整流电路，它是最常用的相控电源电路之一。有关这类电路，电力电子技术的教科书^[1]中有详细的介绍，这里不再赘述。就图 1-4 所示的单相全控桥式整流电路而言，其输出的直流电压中包含 100Hz 的纹波，如果改为三相全控桥式整流电路，直流输出电压中的纹波频率就变为 300Hz。但是不论采用哪一种形式的相控整流电路，其中的电力电子器件（晶闸管）的开关频率都是以工频为基础的，在我国即为 50Hz（单相桥的 100Hz 是 50Hz 的 2 倍，三相桥的 300Hz 是 50Hz 的 6 倍）。

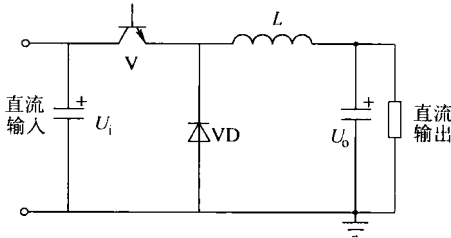


图 1-3 非隔离降压型开关电源电路

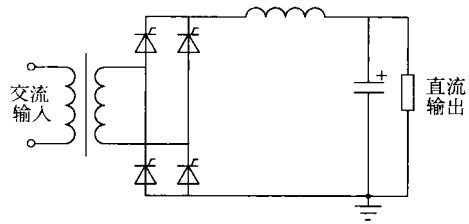


图 1-4 晶闸管相控整流电路

和开关电源相同，相控电源中的电力电子器件也是工作在开关状态，只是其工作频率是工频，而不是高频。相比之下，相控电源的一个显著优点是电路简单，控制方便。它的主要缺点是也要使用一个工频变压器 T，使得整个电源的体积大、重量重，这一点和线性电源类似。另外，相控电源的直流输出电压纹波频率仅是工频的几倍（单相全控桥为 2 倍，三相全控桥为 6 倍），需要较大的滤波器才有较好的滤波效果。而开关电源直流输出电压的纹波频率很高，常在 20kHz 以上，因此只需要很小的滤波器就可以了。由于相控电源的开关频率低，其对控制的响应速度也比开关电源要慢。

按照目前的习惯，开关电源专指电力电子器件工作在高频开关状态下的直流电源，因此，开关电源也常被称为高频开关电源，而相控电源则不包括在开关电源之内。因此可以说，开关电源是高频直流开关电源的简称，其中“高频”排除了相控电源，而“直流”排除了交流电源（如 UPS 等电力电子器件处于开

关状态，但它是交流电源)。

上面简单介绍了线性电源、开关电源和相控电源三种直流电源，表 1-2 比较了它们的主要特点和适用范围。

表 1-2 三种直流电源的比较

种类	器件工作状态	工作频率	体积	重量	效率	响应速度	输出纹波	应用范围
线性电源	线性放大	零	大	重	低	快	极小	对输出纹波和电磁干扰要求极严时
开关电源	开关状态	高	小	轻	高	快	小	中小功率
相控电源	开关状态	低	大	重	较高	慢	大	大功率

就电源而言，除上述直流电源外，还有一大类是交流电源。例如，UPS 提供的是恒频恒压 (Constant Voltage Constant Frequency, CVCF) 电源，变频器提供的是变频变压 (Variable Voltage Variable Frequency, VVVF) 电源，它们中的电力电子器件都工作在开关状态，工作频率也较高，但它们都不属于开关电源。

综上所述，同时具备三个条件的电源可称之为开关电源。这三个条件就是：开关（电路中的电力电子器件工作在开关状态而不是线性状态）、高频（电路中的电力电子器件工作在高频而不是接近工频的低频）和直流（电源输出是直流而不是交流）。

如前所述，开关电源是从线性电源发展而来的，这就是它被称为“开关”电源的原因。由于其前身是线性电源。因此它是各种电子装置、许多电气控制设备都采用的电源。在开关电源出现之前，这些装置的工作电源都采用线性电源。由于计算机等电子装置的集成度不断增加，功能越来越强，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，这就成了开关电源技术发展的强大动力。

新型电力电子器件的发展给开关电源的发展提供了物质条件。20 世纪 60 年代末，垂直导电的高耐压、大电流的双极型电力晶体管 [BJT, 亦称巨型晶体管 (GTR)] 的出现，使得采用高工作频率的开关电源得以问世，那时确定的开关电源的基本结构一直沿用至今。

开关频率的提高有助于开关电源体积减小、重量减轻。早期的开关电源的开关频率仅为数千赫，随着开关器件以及磁性材料性能的不断改进，开关频率也逐步提高。但当频率达到 10kHz 左右时，变压器、电感等磁性元件发出的噪声就变得很刺耳。为了减小噪声并进一步减小体积，在 20 世纪 70 年代开关频率终于突破了人耳听觉极限的 20kHz。这一变化甚至被称为“20kHz 革命”。后来，随着电力 MOSFET 的应用，开关电源的开关频率进一步提高，使得电源体积更

小，重量更轻，功率密度更进一步提高。

由于和线性电源相比，开关电源在绝大多数性能指标上都具有很大的优势。因此，目前除了对直流输出电压的纹波要求极高的场合以外，开关电源已经全面取代了线性电源。计算机、电视机、各种电子仪器的电源几乎都已是开关电源的一统天下。

作为电子装置的供电电源，线性电源主要用于小功率范围。因此，在 20 世纪 80 年代以前，作为线性电源的更新换代产品，开关电源也主要用于小功率场合。那时，中大功率直流电源仍以晶闸管相控电源为主。但是，80 年代起，由于绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的出现打破了这一格局。

IGBT 可以看成是 MOSFET 和 BJT 复合而成的器件。和 BJT 相同，它们都主要应用于中等功率场合。但是和 BJT 相比，IGBT 工作频率更高，且属于电压驱动型器件，易于驱动，具有突出的优点而没有明显的缺点。因此，IGBT 迅速取代了昙花一现的 BJT，而成为中等功率范围的主流器件，并且不断向大功率方向拓展其生存空间。

IGBT 的出现使得开关电源的容量不断增大，在许多中等容量范围内迅速取代了相控电源。在通信领域，早期的 48V 基础电源几乎都是采用的晶闸管相控电源，现在已逐步被开关电源所取代。电力系统的操作用直流电源以前也是采用晶闸管相控电源，目前开关电源已经成为其主流。此外，电焊机、电镀装置等传统的晶闸管相控电源的应用范围，也逐步被开关电源所蚕食。

如前所述，开关频率的提高可以使电源体积减小、重量减轻，但却使得开关损耗增大，电源效率降低。另外，开关频率的提高也使得电源的电磁干扰问题变得突出起来。为了解决这一问题，20 世纪 80 年代出现了采用准谐波技术的零电压开关电路和零电流开关电路，这种技术被称为软开关技术。采用软开关技术，在理想情况下可使开关损耗降为零，提高效率，同时也使电磁干扰大大减小，因而也有助于进一步提高开关频率，使得电源进一步向体积小、重量轻、效率高、功率密度大的方向发展。经过近 20 年的发展，对于软开关技术的研究至今仍十分活跃，它也已经成为应用于各种电力电子电路的一项基础性技术。但是，迄今为止，软开关技术应用最为成功的领域仍然是在开关电源领域。

如图 1-2 所示，开关电源和交流电网连接的电路通常都是二极管整流电路，这种电路的输入电流已不再是正弦波，而含有大量的谐波，这也使得电源的功率因数很低。当公用网上接有大量的开关电源负载时，就会对电网产生严重的谐波污染。最近几年经常听到“绿色电源”这个名词。这里所说的“绿色”，其标志主要就是对电网不产生谐波污染，对环境不产生电磁干扰，当然也包括不产生噪声。为了降低开关电源对电网的谐波污染，提高开关电源的功率因数，在 20 世纪 90 年代出现了功率因数校正（Power Factor Correction, PFC）技术，

并在各种开关电源中大量应用。目前，单相 PFC 技术已比较成熟，并广泛用于各种开关电源中，而三相 PFC 技术则还有很长的路要走。

1.3 开关电源的应用

以上简述了开关电源的发展史。应用即社会需求，社会需求是技术发展的原动力，开关电源的发展过程清楚地表明了这一点。目前，计算机的发展十分迅速，因此，开关电源最主要的市场还是在小功率领域，而且正是由于在小功率领域的成功应用，使得软开关技术在小功率领域发展得最为成熟。除计算机外，在各种电子设备中，开关电源应用得十分广泛。可以说，凡是电子设备，总是离不开电源，大凡电源，就用开关电源，这几乎成了规律。

另外，在工业领域，所用的电动机非常多，而且大量使用伺服电动机。一般来说，伺服电动机可分为直流和交流两大类，从长远看，伺服电动机当然是交流的天下，这一点不容怀疑。但当前，直流伺服电动机还有重要位置，而直流伺服电动机的供电系统绝大部分都用开关电源。

在中等功率以至较大功率领域，传统相控电源使用较多。但现在，使用开关电源已逐渐成为一种趋势。由于开关电源的优势十分明显，其在电力操作电源、通信电源的应用也很成功，由于电力 MOSFET 并联技术的发展，使它在焊接电源以至电镀电源中发展也很成功，并已为市场所逐步接受。

开关电源技术属于电力电子技术的范畴，而且在电力电子技术中占有十分重要的地位。对于这一观点，现在谁都不会否认。但开关电源技术却是在模拟电子学领域孕育而生的。20 世纪 60 年代，当从事整流器行业的技术人员正热衷于晶闸管相控电源研究时，用于各种电子装置的线性电源的缺点已充分显示出来，需要一种采用新技术的替代产品。于是，从事电子技术研究开发的工程技术员顺应这一市场需求，开发了开关电源技术，并且迅速取得了成功，使其成为一项主流技术。正是由于这一原因，早期及中期有关开关电源的书籍大多是由从事模拟电子技术的学者和技术人员撰写的^[2-4]。

电力电子技术可以用图 1-5 的倒三角形来描述，它是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的，这一观点已被全世界普遍接受。这说明电力电子技术的产生和电子技术有十分密切的关系，开关电源技术的产生过程也清楚地说明了这一点。

随着人们对开关电源技术研究的不断深

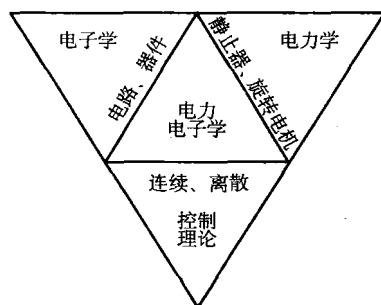


图 1-5 描述电力电子技术的倒三角形