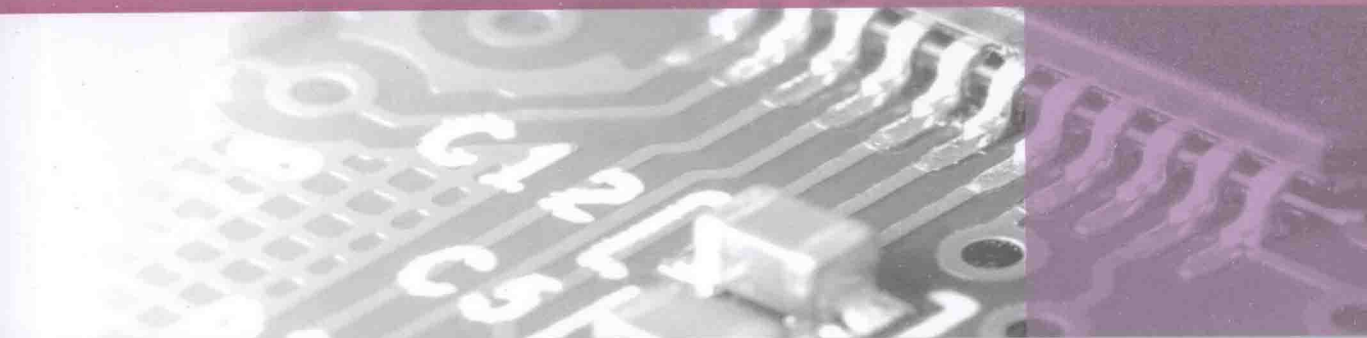




普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

开关电源原理及应用设计

王水平 周佳社 李 丹 孙 柯 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

开关电源原理及应用设计

王水平 周佳社

编著

李 丹 孙 柯

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要讲述了开关电源的原理、设计及其应用电路。全书共分为4章。第1章是开关电源基础知识,讲述了开关电源的三种最基本的电路类型,即降压、升压和反极性式开关电源的工作原理、电路设计以及有关整流、滤波、驱动、控制和保护电路的原理和设计,并且对磁性材料、磁芯结构、漆包线、功率开关变压器的加工工艺和绝缘处理等进行了较为详细的介绍。另外,还简明扼要地介绍了目前刚刚兴起的同步整流技术。第2章、第3章和第4章分别讲述了单端式、推挽式和桥式开关电源电路的工作原理、电路设计以及应用电路举例。在讲述过程中重点突出了功率开关变压器的设计与计算以及各种电路结构的变形或拓扑技术。

本书具有较强的实用性和可操作性,可作为高等院校、中等专业技校和职业高中等电力电子技术专业师生的教材或教材参考书,也可供从事开关电源设计、开发、生产、调试工作的工程技术人员阅读,还可作为电力电子技术方面的研究所或企业的职工培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源原理及应用设计 / 王水平等编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.2

ISBN 978-7-121-25579-3

I. ①开… II. ①王… III. ①开关电源—高等学校—教材 IV. ①TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 034003 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 19.25 字数: 495 千字

版 次: 2015 年 2 月第 1 版

印 次: 2015 年 2 月第 1 次印刷

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 zltts@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

节约能源、净化环境是建立和谐社会的重要内容之一，而在与电有关的领域，节约能源、净化环境，以及绿色能源开发利用的首选技术就是开关电源技术。

由于本书的读者对象为工程技术人员，仪器仪表、家电维修人员，大专院校、职校师生等，因此作者在编写的过程中力图做到章节的划分更趋合理，工作原理的分析更加简洁明了，电源电路设计的方法更为实用，变压器的计算和设计更加详细准确，应用电路的举例更具有先进性、通用性和广泛性。作者在查阅了大量开关电源方面的论文、资料和书籍的基础上，集多年来从事电源方面教学、科研和产品开发的经验，紧紧围绕开关电源电路的设计、研制与开发者所希望的既实用、通用、明了和简洁的要求来编写本书。

近年来，随着微电子技术和工艺、磁性材料科学以及烧结加工工艺与其他边沿技术科学的不断改进和飞速发展，开关电源技术（DC/DC、DC/AC、AC/DC、AC/AC 等各种非线性高频变换技术）有了突破性的进展，并且由此也产生了许多能够提高人们生活水平和改善人们工作条件的新产品，如电动自行车、自动挡汽车（其中包括自动挡电瓶汽车）、变频空调、逆变焊机、快速充电器、电力机车、电力冶炼设备等。开关电源以其独有的体积小、重量轻、效率高、功率因数大、输出形式多样化（主要指路数和极性）、稳压范围宽等特点已经渗透到了与电有关的各个领域。在这些领域中，原来由线性降压变压器构成的前级线性稳压电源，由晶闸管构成的前级相控开关电源和磁饱和原理构成的各种降压、稳压和升压等交流电子设备，不是体积大、重量重、效率低、功率因数小，就是工作特性受电网频率和电网电压波动影响大，现在都已让位于开关电源，而传统的线性电源只能作为开关电源的末级稳压电源而被使用。另外，开关电源技术和实用化产品的出现，使许多电子产品采用电池供电成为可能，使许多电子产品小型化和微型化后变为便携式产品成为可能。所以开关电源成为各种电子设备和系统高效率、低功耗、安全可靠运行的关键，同时开关电源技术目前已成为电子技术中备受人们关注的领域。

本书内容共分 4 章。第 1 章除了讲述线性电源与开关电源之间的差别以外，还重点讲述了开关电源的三种最基本的电路类型，即降压、升压和反极性式开关电源的工作原理、电路设计以及有关整流、滤波、驱动、控制和保护电路的原理和设计，并且对磁性材料、磁芯结构、漆包线、开关变压器的设计、加工工艺和绝缘处理等进行了较为详细的介绍，最后还简明扼要地介绍了目前刚刚兴起的同步整流技术。第 2、第 3 和第 4 章分别讲述单端式、推挽式和桥式开关电源电路的工作原理、电路设计以及应用电路举例。在讲述过程中除了重点突出变压器的设计与计算以外，还重点突出了各种电路结构的变形、软开关或拓扑技术，特别是单端正激式电路结构。本书第 1、2 章由王水平和周佳社完成，第 3、第 4 章由王水平和李

丹完成。

在本书的编写过程中，作者参阅了大量的国内外有关开关电源方面的论文、专著和资料，在此对这些论文、专著和资料的作者和编者表示谢意。此外，在本书定稿之前，中国电源学会理事、陕西省电源学会理事长侯振义教授和中国电源学会理事、中国电源学会特种电源专业委员会主任史平均高级工程师分别对本书进行了认真详细的审阅，提出了许多宝贵的修改意见，使得本书更加完善，在此也表示诚挚的谢意。

由于作者的文字组织能力和专业技术水平有限，因此书中的不足之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵的批评意见。

作 者
2015 年 2 月

目 录

第 1 章 开关电源基础知识	1
1.1 线性电源与开关电源	1
1.1.1 线性电源概述	1
1.1.2 开关电源概述	2
1.1.3 开关电源的发展	4
1.1.4 开关电源的种类	7
1.1.5 练习题	13
1.2 脉宽调制器和正弦波脉宽调制器	13
1.2.1 脉宽调制器	13
1.2.2 正弦波脉宽调制器	14
1.2.3 PWM/SPWM 驱动器的种类	15
1.2.4 练习题	16
1.3 降压型开关电源	17
1.3.1 降压型开关电源的电路结构	17
1.3.2 降压型开关电源的工作原理	18
1.3.3 降压型开关电源重要参数的计算	19
1.3.4 降压型开关电源的设计	25
1.3.5 练习题	29
1.4 升压型开关电源	29
1.4.1 升压型开关电源的电路结构	29
1.4.2 升压型开关电源的工作原理	29
1.4.3 升压型开关电源的设计	32
1.4.4 功率因数校正电路	36
1.4.5 练习题	41
1.5 极性反转型开关电源	41
1.5.1 极性反转型开关电源的电路结构	41
1.5.2 极性反转型开关电源的工作原理	41
1.5.3 极性反转型开关电源重要参数的计算	43
1.5.4 练习题	43
1.6 开关电源中的几个重要电路	43
1.6.1 控制电路	43
1.6.2 驱动电路	45
1.6.3 保护电路	47
1.6.4 练习题	53

1.7	开关电源中的几个重要问题	53
1.7.1	开关功率管的二次击穿问题	53
1.7.2	开关电源中的电磁兼容 (EMC) 问题	56
1.7.3	开关电源中的整流和滤波问题	58
1.7.4	开关电源中的接地、隔离和屏蔽问题	70
1.7.5	开关电源中的 PCB 布线问题	87
1.7.6	练习题	94
1.8	磁性材料、磁芯结构、漆包线、功率开关变压器 的加工工艺和绝缘处理	94
1.8.1	共模电感和差模电感	95
1.8.2	功率开关变压器的工作状态	101
1.8.3	磁性材料与磁芯结构的选择	104
1.8.4	漏感和分布电容的计算	110
1.8.5	趋肤效应	114
1.8.6	磁性材料的磁特性	116
1.8.7	功率开关变压器绕组导线规格的确定	129
1.8.8	绝缘材料以及功率开关变压器所选用骨架材料的技术参数	135
1.8.9	功率开关变压器的装配与绝缘处理	139
1.8.10	练习题	141
第 2 章	单端式开关电源实际电路	142
2.1	单端式开关电源实际电路的类型	142
2.1.1	按激励方式划分	142
2.1.2	按功率开关管的种类划分	144
2.1.3	练习题	147
2.2	单端自激式正激型开关电源电路	148
2.2.1	单端自激式正激型开关电源的工作原理	148
2.2.2	单端自激式正激型开关电源的其他电路	150
2.2.3	功率开关变压器的设计	152
2.2.4	练习题	153
2.3	单端自激式反激型开关电源电路	153
2.3.1	单端自激式反激型开关电源的三种工作状态	153
2.3.2	单端自激式反激型开关电源电路中的几个实际问题	157
2.3.3	单端自激式反激型开关电源电路中功率开关变压器的设计	159
2.3.4	单端自激式反激型开关电源的启动电路	162
2.3.5	单端自激式反激型开关电源的实际应用电路	166
2.3.6	练习题	171
2.4	单端他激式正激型开关电源电路	171
2.4.1	单端他激式正激型开关电源的基本电路形式	171
2.4.2	单端他激式正激型开关电源电路中的功率开关管	173
2.4.3	单端他激式正激型开关电源电路的变形	174

2.4.4	单端他激式正激型开关电源电路中的 PWM 电路	183
2.4.5	单端他激式正激型开关电源电路中功率开关变压器的设计	184
2.4.6	练习题	186
2.5	单端他激式反激型开关电源电路	187
2.5.1	单端他激式反激型开关电源的基本电路结构	187
2.5.2	单端他激式反激型开关电源电路中的功率开关管	189
2.5.3	单端他激式反激型开关电源电路的变形	190
2.5.4	单端他激式反激型开关电源电路中的 PWM 电路	191
2.5.5	单端他激式反激型开关电源电路中功率开关变压器的设计	191
2.5.6	练习题	196
第 3 章	推挽式开关电源的实际电路	197
3.1	自激型推挽式开关电源电路	197
3.1.1	自激型推挽式开关电源电路的构成与原理	199
3.1.2	自激型推挽式开关电源电路中功率开关变压器的设计	204
3.1.3	自激型推挽式开关电源电路中功率开关管的选择	206
3.1.4	自激型推挽式双变压器开关电源电路	210
3.1.5	自激型推挽式开关电源应用电路举例	213
3.1.6	练习题	214
3.2	他激型推挽式开关电源实际电路	215
3.2.1	他激型推挽式开关电源电路中的功率开关变压器	216
3.2.2	他激型推挽式开关电源电路中的功率开关管	216
3.2.3	他激型推挽式开关电源电路中的双管共态导通问题	217
3.2.4	他激型推挽式开关电源电路中的 PWM/PFM 电路	223
3.2.5	他激型推挽式开关电源电路设计实例	228
3.2.6	练习题	241
第 4 章	桥式开关电源的实际电路	242
4.1	自激型半桥式开关电源实际电路	245
4.1.1	电流控制型磁放大器半桥式三输出开关电源应用电路	245
4.1.2	300W、12V/24V/36V 幻灯机和投影仪开关电源应用电路	248
4.1.3	PS60-2 (60W) 射灯开关电源应用电路	251
4.1.4	400W、36V 幻灯机和投影仪开关电源应用	251
4.1.5	练习题	252
4.2	他激型半桥式开关电源实际电路	252
4.2.1	他激型半桥式开关电源电路的工作原理	252
4.2.2	他激型半桥式开关电源电路的设计	257
4.2.3	多路他激型半桥式开关电源电路	269
4.2.4	他激型半桥式开关电源电路中的 PWM 电路	274
4.2.5	练习题	274
4.3	全桥式开关电源实际电路	275

4.3.1 全桥式开关电源电路的工作原理.....	275
4.3.2 全桥式开关电源电路的设计.....	276
4.3.3 全桥式开关电源电路中的 PWM 电路.....	278
4.3.4 练习题	296
参考文献	297

第 1 章 开关电源基础知识

1.1 线性电源与开关电源

1.1.1 线性电源概述

采用线性电源电路中的调整功率管工作在线性放大区。线性电源的工作过程可简述为：将 220V/50Hz 的工频电网电压经过线性变压器变压以后，再经过整流、滤波和线性稳压，最后输出一个纹波电压和稳定性均能符合要求的直流电压。其原理方框图如图 1-1 所示。

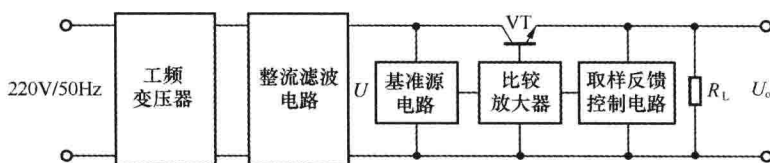


图 1-1 线性电源原理框图

1. 线性电源的优点

- ① 电源稳定度较高。
- ② 输出纹波电压较小。
- ③ 瞬态响应速度较快。
- ④ 线路结构简单，便于理解和维修。
- ⑤ 无高频开关噪声。
- ⑥ 成本低。
- ⑦ 工作可靠性较高。

2. 线性电源的缺点

- ① 内部功耗大，转换效率低，其转换效率一般只有 45% 左右。
- ② 体积大，重量重，不便于微型化。
- ③ 滤波效率低，必须具有较大的输入和输出滤波电容。
- ④ 输入电压动态范围小，线性调整率低。
- ⑤ 输出电压不能高于输入电压，同时也不能反极性输出。
- ⑥ 单路输入时，不能多路输出。

3. 造成这些缺点的原因

① 从图 1-1 所示的线性电源原理框图中可以看出，调整管 VT 在电源的整个工作过程中一直是工作在晶体管特性曲线的线性放大区。调整管 VT 本身的功耗与输出电流成正比，调整管 VT 集-射极的管压降等于输入与输出电压差。这样一来，调整管 VT 本身的功耗不但随电源输出电流的增大而增大，而且还随输入与输出电压差的增大而增大，使调整管 VT 的温

度急剧升高。为了保证调整管 VT 能够正常的工作，除选用功率大、耐压高的管子外，还必须采取一些必要的散热措施对管子进行冷却，如加散热器或轴流风机等进行风冷，这样又会导致电源整机体积大、重量重。

② 线性电源电路中使用了 50Hz 工频变压器，通常把这种变压器称之为线性变压器。这种线性变压器的效率一般可以做到 80%~90%。这样不但增加了电源的体积和重量，而且也大大降低了电源的效率。

③ 由于线性电源电路的工作频率较低，为 50Hz，因此要降低输出电压中纹波电压的峰-峰值，就必须增大滤波电容的容量。

④ 由于线性电源电路中的调整管工作在线性放大区，只有在增大调整管集-射极管压降的基础上，才能实现稳压的目的。因此线性稳压器只有一般压差和低压差系列产品，而没有升压和极性反转式系列产品。

1.1.2 开关电源概述

1. 开关电源的结构

图 1-2 所示电路是开关电源原理框图和等效原理图。开关电源由全波整流器、开关功率管 VT、脉宽调制/脉频调制 (PWM/PPM) 控制与驱动器、续流二极管 VD、储能电感 L 、输出滤波电容 C 和取样反馈电路等组成。实际上，开关电源的核心部分是一个直流变换器。这里对直流变换器和逆变器做如下介绍。

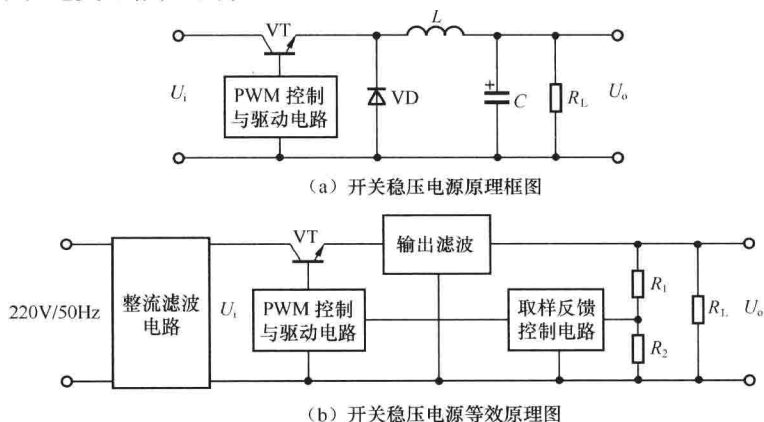


图 1-2 开关电源原理框图和等效原理图

① 逆变器。它是把直流转变成交流的装置。逆变器通常被广泛应用在由电瓶（又称蓄电池）或电池组组成的备用电源中（UPS 电源就是逆变器中最为常用的实例）。

② 直流变换器。它是把直流转变成交流，然后又把交流转换成具有不同输出的直流的装置。这种装置被广泛应用在开关电源电路中。采用直流变换器可以把一种直流供电电压变换成输出极性、路数和电压数值各不相同的多种直流供电电压，并且输入与输出之间可以是隔离式的，也可以是不隔离式的。

2. 开关电源的优点

(1) 内部功率损耗小，转换效率高

图 1-2 所示的开关电源原理电路中, 开关功率管 VT 在 PWM (PFM) 驱动信号的驱动下, 交替工作在导通-截止与截止-导通的开关状态, 转换速度非常快, 频率一般可高达几百 kHz 左右, 在一些电子工业发达和先进的国家, 可以做到兆赫级。这便使开关功率管 VT 上的功率损耗大为减小, 储能电感的电感量大为减小, 储能效率大为提高。因此整个开关电源的转换效率可以大幅度提高, 其转换效率可高达 95% 左右。

(2) 体积小, 重量轻

从开关电源的原理电路图中可以清楚地看出, 这里没有采用笨重的工频变压器。由于开关功率管 VT 工作在开关状态, 因此其本身的功率损耗大幅度降低, 这样就省去了较大的散热器。另外, 由于电路的工作频率比线性稳压电源中的 50Hz 工频高了几个数量级, 因此滤波效率大大提高, 滤波电容的容量也大为减小。这三方面的原因就使得开关电源具有体积小、重量轻的显著优点。

(3) 稳压范围宽, 线性调整率高

开关电源的输出电压是由脉宽调制/脉频调制 (PWM/PFM) 驱动信号的占空比来调节的。输出电压由于输入信号电压的变化而引起的不稳定, 可以通过调节脉冲宽度或脉冲频率来进行补偿。这样, 在输入工频电网电压变化较大时, 开关电源仍能够保证具有非常稳定的输出电压。因此开关电源不但具有稳压范围宽, 而且还具有稳压效果好和线性调整率高的优点。此外, 改变占空比的方法有脉宽调制型和脉频调制型两种。因此, 开关电源不仅具有以上所说的优点, 而且实现稳压的方法和技术也较多, 设计人员可以根据实际应用的要求和需要, 灵活地选用各种类型的开关电源电路。

(4) 滤波效率大为提高, 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成熟技术基本是在 50kHz 以上, 是线性稳压电源工作频率的 1000 倍以上。因此, 开关电源整流后的滤波效率也几乎提高了 1000 倍左右。即使采用半波整流后加电容滤波, 开关电源的滤波效率也比线性稳压电源高 500 倍左右。在相同输出纹波电压的要求下, 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容量的 1/1000~1/500。

(5) 电路形式灵活多样, 选择余地大

例如, 有自激式和他激式, 有调宽型和调频型, 有单端式和双端式, 有升压式、降压式和极性反转式等。设计者可以发挥自己的聪明才智, 充分利用各种类型电路的优点, 设计出能够满足不同应用场合的开关电源。

3. 开关电源的缺点

(1) 开关电源存在着较为严重的开关噪声和干扰

开关电源电路中, 由于开关功率管工作在开关状态, 所产生的高频交流电压和电流将会通过电路中的其他元器件产生尖峰干扰和谐振噪声, 这些干扰和噪声如果不采取一定的措施进行抑制、消除和屏蔽, 就会严重影响整机的正常工作。此外, 由于开关电源电路中的振荡器没有工频降压变压器的隔离作用, 这些干扰和噪声就会窜入工频电网, 使附近的电子仪器、设备和家用电器等受到严重干扰。另外, 这种高频干扰还会通过开关电源电路中的磁性元件 (如电感和开关变压器等) 辐射到空间, 使周围的电子仪器、设备和家用电器等也同样受到严重的干扰。

(2) 电路结构复杂, 不便于维修

对于无工频变压器的开关电源电路中的高压、高温电解电容, 高反压、大电流开关功率

管,高频开关变压器的磁性材料,高反压、大电流、快恢复肖特基二极管等元器件,在我国还处于研究、开发和试制阶段。在一些技术发达的国家,开关电源虽然有了一定的发展,但在实际应用中还存在着一定的问题,不能令人十分满意。这就暴露出了开关电源的另一个缺点,那就是电路结构复杂,故障率高,维修麻烦。对此,如果设计者和生产者不予以充分重视,将直接影响着开关电源的推广应用。

(3) 成本高,可靠性低

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烧结技术等与一些技术发达国家相比还有一定的差距,因此开关电源的造价和成本不能进一步降低,这也影响到可靠性的进一步提高。这样就导致了我国的电子仪器、仪表以及机电一体化设备中的开关电源还不能得到进一步的普及应用。

1.1.3 开关电源的发展

1. 国际发展状况

(1) 开关电源的发展史

1955 年美国的科学家罗耶 (G·H·Royer) 首先研制成功了利用磁芯的磁饱和来进行自激振荡的晶体管直流变换器。此后,世界各地利用这一技术的各种形式的晶体管直流变换器不断地被研制出来,从而取代了早期采用的寿命短、可靠性差、转换效率低的旋转式和机械振子式换流设备。由于晶体管直流变换器中的功率晶体管工作在开关状态,由此制成的稳压电源输出路数多,输出极性可变,转换效率高,体积小,重量轻,因而当时被广泛应用于航海、航空以及军事电子设备上。由于那时的微电子设备和技术十分落后,不能够研制出耐压较高、开关速度较快、功率较大的开关晶体管,因此这个时期的直流变换器只能采用低电压输入,并且转换的速度也不能太高,工作频率仅局限于千赫量级。另外,由于输入电压不能过高,因此当时的直流变换器中还含有工频降压变压器。

20 世纪 60 年代末,随着微电子技术的不断进步,高反压、大电流的功率开关晶体管出现了,从此直流变换器就可以直接由工频电网电压经整流、滤波后输入供电,终于淘汰了体积大、重量重、效率低的工频降压变压器。这迅速扩大了晶体管直流变换器的应用范围,并在此基础上诞生了无工频变压器的开关电源。由于省掉了工频降压变压器,开关电源的体积和重量大幅度减小和降低,开关电源才真正走上了效率高、体积小、重量轻而被推广普及应用的道路。

20 世纪 70 年代以后,与这种技术有关的高频率、高反压、大电流的功率开关晶体管,高频率、高温电容,高反压、大电流、快恢复肖特基二极管,高频变压器磁芯材料等元器件也不断地被研制、生产出来,使无工频变压器开关电源不断得到完善和快速发展,并且被迅速而又广泛地应用于电子计算机、通信、航海、航天、航空、军事电子设备、医疗仪器、分析仪器和家用电器(特别是电视机)等领域中,从而使无工频变压器的开关电源成为各种设备供电电源中的佼佼者。

(2) 目前正在克服的困难

随着电力电子技术和微电子技术的高速发展,集成度高、功能强的大规模集成电路(IC)的不断出现,电子设备的体积不断缩小,重量不断减轻,内部功率损耗不断减少。因此,一台电子设备能否小型化、微型化、成为便携式的关键,就是开关电源能否小型化、微型化、模块化。开关电源的小型化、微型化、模块化就成为技术人员研究和探讨的核心和热

点。从事开关电源研究和生产的技术人员对开关电源电路中的变压器还感到不是十分的理想，他们正致力于研制出转换效率更高、体积更小、重量更轻的开关变压器或者通过其他的途径和方法来取代电路中的变压器，使之能够满足电子仪器和设备小型化和微型化的需要。这就是从事开关电源研究工作的科技人员目前正在解决的第一个难题。

开关电源的效率是与开关功率管的变换速度成正比的，并且开关电源中采用了开关变压器以后，才能使之由一组输入电压得到极性、大小各不相同的多路输出电压。要进一步提高开关电源的转换效率，就必须提高其工作频率。但是当工作频率提高以后，开关电源对整个电路中的元器件又有了新的要求。例如，高频电容、功率开关晶体管、高频开关变压器、储能电感、快恢复续流二极管、PCB 材料及 PCB 电路设计等都会出现新的问题。进一步研制适应开关电源高频率工作的有关元器件和 PCB 材料及 PCB 电路，就成了从事开关电源研究、设计和生产的科技人员要解决的第二个难题。

工作在线性放大状态的线性稳压电源电路具有稳压和滤波的双重作用，同时工作频率又在较低的工频 50Hz，因而串联线性稳压电源不会产生开关噪声和干扰，并且输出纹波电压也较低。但是开关电源电路中的开关功率管工作在频率较高的开关状态，其高频电压和电流会通过电路中的元器件和 PCB 引线辐射和传播较强的尖峰干扰和谐振噪声。这些干扰和噪声会污染工频电网和周围环境，影响邻近的电子仪器和设备的正常工作。随着开关电源电路和抑制干扰、噪声措施的不断改进和提高，开关电源的这一缺点得到了一定的抑制和克服，可以达到不妨碍一般电子仪器、设备和家用电器正常工作和正常使用的程度。但是，在一些对输出稳定度和输出纹波要求较高的精密电子测量仪器和仪表中，开关电源的这一缺点使它不能得到应用，导致这些高精度仪器和仪表要么采用电池或电瓶供电，要么就不能小型化、微型化而成为便携式仪器和仪表。所以克服开关电源的这一缺点，进一步提高它的输出稳定度和降低它的输出纹波电压，扩大它的适用范围，就成了从事开关电源研究、设计和生产的科技人员要解决的第三个难题。

工作在开关状态的开关电源电路中的功率开关晶体管上的损耗主要包括驱动导通的上升时间内的损耗、驱动关断的下降时间内的损耗、导通以后由于管压降不能为零而产生的损耗和关断以后由于漏电流不能为零而引起的损耗这四部分。其中驱动导通的上升时间内的损耗和驱动关断的下降时间内的损耗这两部分损耗可以通过提高开关功率管的工作速度来解决，而导通以后由于管压降不能为零而产生的损耗和关断以后由于漏电流不能为零而引起的损耗这两部分则必须通过寻求新的驱动方式和新的开关功率管来解决。新的驱动方式和新的开关功率管主要指的是开关电源中的开关工作状态应该是零流关断和零压导通，也就是电路中的开关功率管关断时漏电流为零，导通时管压降为零（谐振式或软开关模式）。因此，寻求新的驱动方式和研制新的开关功率管便成了从事开关电源研究、设计和生产的科技人员要解决的第四个难题。

（3）面对难题所出现的新突破和新进展

为了解决开关电源应用中所出现的难题，从事开关电源研究的科技人员，以及与这门学科相关的其他学科的科技人员在不懈地努力和探索着。首先是从事开关电源研究的科技人员设计和研制出了谐振式开关电源，从根本上解决了由于开关功率管上的功耗大而导致开关电源转换效率低的问题，同时也从根本上解决了由于开关功率管上的电流和电压应力大而导致开关电源可靠性和稳定性低的问题。另外，从事半导体技术和工艺研究的科技人员几乎在同

一时期也设计和研制出了具有零流关断和零压导通的复合开关功率管 IGBT（其中也包括智能型 IGBT（MCBT））。这种复合开关功率管 IGBT 是把门极关断晶闸管（GTR）和 MOSFET 的优点集于一体，取长补短形成了既具有 MOSFET 输入驱动所需功率非常小的输入特性，又具有 GTR 导通以后管压降非常小的（主要是导通电阻非常小）输出特性。谐振式开关电源电路结构再加上复合开关功率管 IGBT，使开关电源可以拓展到大功率和超大功率的应用场合，如逆变焊机、电瓶汽车、电力机车、磁悬浮列车和直流输电等。

2. 国内发展情况

我国晶体管直流变换器和开关电源的设计、研制和生产开始于 20 世纪 60 年代初期，到 60 年代中期进入了实用阶段。70 年代初期开始设计、研制和生产无工频降压变压器的开关电源。1974 年研制成功了我国的第一台工作频率 10kHz、输出直流电压为 5V 的无工频降压变压器的开关电源。近 10 年来，我国的许多研究所、工厂和高等院校纷纷研制出多种型号和多种用途的工作频率在 20kHz 左右、输出功率在 1000W 以下的无工频降压变压器的开关电源，并应用于电子计算机、通信、电视机等方面，取得了非常好的效果。工作频率为 100~200kHz、无工频降压变压器的高频开关电源是 80 年代初期开始试制，90 年代初期试制成功，目前正在走向实用和进一步提高工作频率的阶段。许多年来，虽然我国的科技人员在无工频降压变压器开关电源方面坚持独立自主、自力更生的道路，历尽千辛万苦，一直在不懈地努力奋斗，并取得了可喜可贺的巨大成果，但是我国的开关电源技术与一些先进的国家相比仍有巨大的差距。此外，这些年来，我国虽然把无工频降压变压器的开关电源的工作频率从数十千赫提高到数百千赫，把输出功率由数十瓦提高到数百瓦甚至数千瓦，但是，由于我国的半导体技术与工艺跟不上时代的发展，导致我们自己研制和生产出的无工频降压变压器的开关电源电路中的关键元器件，如功率开关晶体管、高频开关变压器磁性材料、储能电感、快恢复续流二极管等大部分仍然通过国外进口。因此，我国的开关电源事业要发展，要赶超世界先进水平，最根本的问题是要提高我国的半导体技术、工艺和我国的磁性材料合成、加工工艺。

衡量一个国家开关电源技术发展的先进与落后，除了要看以上所说的开关电源电路中的那些关键性元器件和磁性材料的发展现状以外，还要看开关电源电路中的脉宽调制（PWM）或正弦波脉宽调制（SPWM）控制与驱动集成电路的发展状态。我国目前市场上所出现的各种各样、五花八门的开关电源产品，不论是小功率、中功率输出式，还是大功率、超大功率输出式；不论是单端输入驱动式，还是双端输入驱动式；不论是输出单路式，还是输出多路式；不论是输出正压式，还是输出负压式；不管是自激式、他激式，还是谐振式；不论是散件式，还是模块式等，所有这些开关电源电路中所使用的 PWM（或 SPWM）控制与驱动集成电路芯片几乎全部都是采用进口产品，仅有极个别的是国产的，所谓国产的也只不过是把进口的芯片拿回来进行了一下封装。可以说，我们国家有关开关电源方面的 PWM（或 SPWM）控制与驱动集成电路芯片的微电子工业几乎等于零。因此，要发展我国的开关电源事业，要赶超世界先进水平，要自立于世界强国之林，我们还必须从零做起，从基础做起。

一个净化环境、净化电网、节约能源和电磁兼容的世界性运动已经在各个国家纷纷掀起。我国由政府倡导的这场运动也正在向与电有关的各个领域渗透，也有相关的规范、法规和标准相继出台。为了积极投身于这场运动，为了满足、实现和通过政府有关这方面的规范、法规和标准，为了加快我国赶超世界先进水平的速度，从事电源行业的技术人员应该带头行动

起来,应该积极地推广、落实和执行政府有关这方面的规范、法规和标准,应该发挥自己在电源技术方面的聪明才智,设计和研制出越来越多的具有净化环境、净化电网、节约能源和电磁兼容功能的交流供电系统和直流稳压电源产品,应该把好一切与电有关的入口关和出口关。

1.1.4 开关电源的种类

现在,电子技术的迅速发展使人们对电子仪器和设备的要求又有了新的内容。在性能上要求更加安全可靠,在功能上不断增加,在使用和操作上自动化和智能化程度要越来越高,在体积和重量上要日趋小型化和微型化,在功耗和电磁兼容上要功率因数大和转换效率高。这就使得采用具有众多优点的开关电源更显重要了,开关电源在计算机、通信、航海、航空、航天、仪器仪表、微控制器、医疗仪器、传感器、家用电器等方面得到越来越多的应用,发挥了不可取代的巨大作用。同时也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增加,开关电源的品种及种类越来越多。常见的开关电源电路的分类方法如下。

1. 按激励方式划分

(1) 他激式开关电源电路

电路内部专门设置有产生 PWM (或 SPWM) 驱动信号的控制与驱动电路。在早期的开关电源产品中,这部分电路均是采用散件电路实现的,但在 20 世纪 80 年代中期以后所生产出来的开关电源产品中,这部分电路均是采用 PWM (或 SPWM) IC 来实现的。该种形式的开关电源电路具有工作稳定、可靠和便于控制的优点,一般都应用于大功率和超大功率输出的场合,其电路结构形式如图 1-3 (a) 所示。

(2) 自激式开关电源电路

电路中的开关功率管既作开关功率管,又兼作 PWM (SPWM) 驱动信号产生的振荡管。在有些较为复杂的自激式电路中,开关功率管与其他晶体管构成复合管来一起完成双重任务。具有该种电路结构形式的开关电源一般都工作在谐振状态,为谐振式开关电源电路。因此其具有内部损耗小、转换效率高、成本低等优点和实现条件苛刻、工作可靠性差、不便于控制等缺点,一般都应用于小功率和中功率输出的场合,其电路结构形式如图 1-3 (b) 所示。

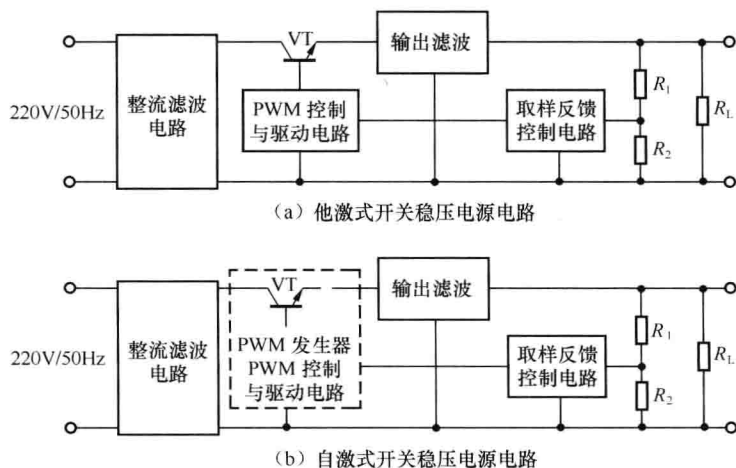


图 1-3 按激励方式所划分的开关电源电路

2. 按调制方式划分

(1) 脉宽调制型开关电源电路

PWM (或 SPWM) 驱动信号的频率保持不变, 通过改变脉冲宽度 (也就是调节占空比) 来实现对输出电压的调节和控制。大部分的开关电源电路均是采用由取样电路、耦合电路等构成的反馈闭环回路, 来控制 PWM (或 SPWM) 驱动信号的脉冲宽度, 最后实现稳定输出电压幅度的目的。

(2) 脉频调制型开关电源电路

PFM (或 SPFM) 驱动信号的占空比保持不变, 通过改变振荡器的振荡频率来实现调节和稳定输出电压幅度的目的。一般自激式开关电源电路多半是采用这种方式来调节和稳定输出电压幅度的。

(3) 混合型开关电源电路

通过调节驱动信号的频率 (PFM 或 SPFM) 和脉冲宽度 (占空比) (PWM 或 SPWM) 来实现调节和稳定输出电压幅度的目的。这种类型的开关电源电路一般均是在重载时工作于 PWM (或 SPWM) 模式, 在轻载或空载时工作于 PFM (或 SPFM) 模式。

3. 按开关功率管的类型划分

(1) 晶体管型开关电源电路

采用 NPN 型或 PNP 型晶体管作为开关功率管。这种电路的优点是开关功率管饱和导通以后, 集-射极导通电阻非常小, 管子的开关损耗较小; 缺点是驱动功率与输出功率成正比, 不易应用在大功率和超大功率输出的场合。这种电路常被应用在家用电器的供电电源电路中, 其电路结构形式如图 1-4 (a) 所示。

(2) 晶闸管 (可控硅) 型开关电源电路

采用晶闸管作为开关功率管。这种电路的优点是可直接输入工频电网电压, 不需要一次整流电路部分, 成本低; 缺点是对工频电网和周围环境的电磁辐射 (EMI) 污染较大, 目前已划归为被淘汰的系列, 其电路结构如图 1-4 (b) 所示。

(3) MOSFET 型开关电源电路

采用 N 沟道或 P 沟道 MOSFET 作为开关功率管。这种电路的特点是驱动功率小, 可直接多管并联工作而不需考虑均流问题, 可应用于输出大功率和超大功率的场合。早期的一些大功率和超大功率开关管稳压电源均属该类型, 其电路结构如图 1-4 (c) 所示。

(4) IGBT 型开关电源电路

采用 IGBT 复合功率模块作为开关功率管。这种电路把晶体管型和 MOSFET 型开关电源电路的优点集于一体, 取晶体管饱和导通电阻极小之长补 MOSFET 导通电阻较大之短, 取 MOSFET 驱动电流极小之长补晶体管型驱动电流较大之短。因此非常适合在中、大和超大功率输出的场合应用, 其电路结构如图 1-4 (d) 所示。

4. 按储能电感的连接方式划分

(1) 串联型开关电源电路

储能电感串联在输出端, 这种电路与后面将要讲到的降压型开关电源电路结构完全相同, 其电路结构如图 1-5 (a) 所示。

(2) 并联型开关电源电路