



电源系列丛书

# 单片开关电源

——应用电路·电磁兼容·PCB布线  
(修订版)

周志敏

周纪海 编著

纪爱华

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



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电源系列丛书



# 单片开关电源

## 应用电路·电磁兼容·PCB 布线

(修订版)

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以单片开关电源高新实用技术为主线,结合国内外单片开关电源的应用,全面系统地阐述了单片开关电源的发展、单片DC/DC转换器、MAXIM单片电源应用电路、单片充电器应用电路、功率因数校正集成控制器、VICOR单片电源的典型应用及单片电源应用电路、电荷泵电源应用电路、单片开关电源的电磁兼容设计技术及单片电源PCB设计技术。

本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗易懂,具有很高的实用价值,可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事单片电源开发、设计和应用的工程技术人员及高等院校师生参考。

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

单片开关电源:应用电路·电磁兼容·PCB布线/周志敏,周纪海,纪爱华编著.一修订本.

—北京:电子工业出版社,2007.7

(电源系列丛书)

ISBN 978-7-121-04382-6

I. 单… II. ①周… ②周… ③纪… III. 单片电路—开关电源 IV. TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第067555号

责任编辑:富 军 特约编辑:李云霞

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订:

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: 28.25 字数: 723.2千字

印 次: 2007年7月第1次印刷

印 数: 5000册 定价: 48.00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

---

随着电子技术的高速发展,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,电子设备与人们工作、生活的关系日益密切,而电子设备都离不开可靠的电源,其性能的优劣直接关系到整个系统的安全性指标和可靠性指标。电子设备的小型化和低成本化使电源以轻、薄、小及高效率为发展方向。目前,我国通信、信息、家电、国防等领域的电源普遍采用高频开关电源。为此,单片开关电源集成电路自1994年问世以来,引起了国内外电源界的普遍关注,现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产品。单片电源以其低损耗、高效率、电路简洁等显著优点而受到人们的青睐,广泛应用在计算机、电子设备、仪器仪表、通信设备和家用电器中。

本书结合国内外单片开关电源技术的发展动向,系统地介绍了单片开关电源典型模块的原理和特性,重点介绍了单片开关电源外围电路的设计及典型应用电路。本书尽量做到有针对性和实用性,力求做到通俗易懂和结合实际,使得从事单片开关电源开发、设计、应用和维护的技术人员从中获益。读者可以以此为“桥梁”,系统全面地了解 and 掌握单片开关电源的设计和应用技术。

本书在2004年版的基础上,对单片开关电源的典型应用电路做了一定的删减和补充,并对单片开关电源的电磁兼容设计技术、单片开关电源PCB设计技术的内容做了修改和增补,使读者可以掌握单片开关电源的电磁兼容设计、PCB设计的实用技术,提高单片开关电源的可靠性及性能指标。新的修订版具有更强的实用性,更加贴近读者的实际应用。

本书在写作过程中,得到了国内专业学者和同行的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,加之作者水平有限,故书中难免有谬误之处,敬请广大读者批评指正。

编著者

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 单片开关电源的发展 .....	1
1.1.1 开关电源 .....	1
1.1.2 开关电源控制方式 .....	5
1.1.3 开关电源常用的电路类型 .....	13
1.2 高频开关电源的发展 .....	17
1.2.1 技术与产业的发展 .....	17
1.2.2 国外开关电源的技术动态 .....	19
<b>第 2 章 单片 DC/DC 转换器</b> .....	27
2.1 DB2800S 单片电源应用电路 .....	27
2.2 YDS100/200 系列单片电源应用电路 .....	28
2.3 L5973AD 单片电源应用电路 .....	29
2.4 LM 系列单片电源应用电路 .....	31
2.4.1 LM1572 单片电源应用电路 .....	31
2.4.2 LM2575 单片电源应用电路 .....	32
2.4.3 LM2576 单片电源应用电路 .....	34
2.4.4 LM2678 单片电源应用电路 .....	38
2.4.5 LM3886 单片电源应用电路 .....	40
2.5 MC33998 单片电源应用电路 .....	42
2.6 NCP5009 单片电源应用电路 .....	44
2.7 NJU7660 单片电源应用电路 .....	47
2.8 SP6644/6645 单片电源应用电路 .....	49
2.9 TL499AC 单片电源应用电路 .....	52
2.10 TPS 系列单片电源应用电路 .....	55
2.10.1 TPS6735 单片电源应用电路 .....	55
2.10.2 TPS6734 单片电源应用电路 .....	55
2.11 X-8438 单片电源应用电路 .....	56
2.12 XC6371 单片电源应用电路 .....	58
2.13 L 系列单片电源应用电路 .....	61
2.13.1 L4970A 典型应用电路 .....	61
2.13.2 L6590 典型应用电路 .....	64
2.13.3 L4960 典型应用电路 .....	64
2.14 机载电源解决方案 .....	65
2.14.1 机载电源的结构设计 .....	66
2.14.2 机载高可靠性开关电源的设计 .....	67

2.14.3	机载小型化计算机电源的设计	70
2.14.4	机载三相交流稳压电源的设计	78
2.15	卫星用多输出精密电源解决方案	81
<b>第 3 章</b>	<b>MAXIM 单片电源应用电路</b>	<b>87</b>
3.1	MAXIM 系列单片电源特性	87
3.2	MAX 系列单片电源应用电路	89
3.2.1	MAX1642/MAX1643 单片电源应用电路	89
3.2.2	MAX668 单片电源应用电路	92
3.2.3	MAX629 单片电源应用电路	95
3.2.4	MAX1715 单片电源应用电路	100
3.2.5	MAX1790 单片电源应用电路	103
3.2.6	MAX1677 单片电源应用电路	107
<b>第 4 章</b>	<b>单片充电器应用电路</b>	<b>110</b>
4.1	锂电池充电解决方案	110
4.1.1	锂离子电池	110
4.1.2	锂离子电池的充电方法	112
4.1.3	低电流精准充电器	116
4.2	单片充电器典型应用电路	120
4.2.1	LT1769 恒流/恒压电池充电芯片应用电路	120
4.2.2	MAX1501 充电芯片典型应用电路	124
4.2.3	UBA2008 充电芯片的典型应用电路	126
4.2.4	基于 LTC4053 的 USB 口充电器	129
4.2.5	ST6210 充电芯片的典型应用电路	130
<b>第 5 章</b>	<b>功率因数校正集成控制器</b>	<b>132</b>
5.1	FA5331P(M)/FA5332P(M)功率因数校正集成控制器	132
5.2	L4981 功率因数校正集成控制器	135
5.3	UC 系列 PFC 集成控制器	136
5.3.1	UC3854 PFC 集成控制器	136
5.3.2	UC3854A/B PFC 集成控制器	138
5.3.3	UCC3858 PFC 集成控制器	143
5.4	HA16141 PFC/PWM 集成控制器	149
5.5	MC34262 系列 PFC 集成控制器	152
5.6	FAN4803 PFC 集成控制器	155
5.7	CM68xx/69xx 系列 PFC + PWM 单片集成控制器	157
5.8	TOPSwitch 在 PFC 中的应用	161
5.9	TDA16888 PFC 集成控制器	166
<b>第 6 章</b>	<b>VICOR 单片电源的典型应用</b>	<b>170</b>
6.1	软开关技术	170
6.1.1	硬开关问题分析	170
6.1.2	软开关的基本概念	171
6.1.3	软开关电路的分类	172
6.1.4	典型的软开关电路工作原理	174



6.2	VICOR 单片电源	178
6.2.1	VICOR 的工作原理	178
6.2.2	第二代 VICOR 性能特点	180
6.3	VICOR 的典型应用电路	183
6.3.1	VICOR 的应用电路	183
6.3.2	并联及 $N+1$ 冗余应用电路	185
<b>第 7 章</b>	<b>典型单片电源应用电路</b>	<b>191</b>
7.1	PWM 开关调整器	191
7.1.1	PWM 开关调整器的特征	191
7.1.2	PWM 开关调整器的典型应用电路	203
7.2	典型单片开关电源电路设计	206
7.2.1	TOP 系列单片电源的应用电路	206
7.2.2	TDA1683x 系列单片开关电源	211
7.2.3	SG6848 单片开关电源特性及应用	213
<b>第 8 章</b>	<b>电荷泵电源应用电路</b>	<b>215</b>
8.1	电荷泵工作特性	215
8.1.1	电荷泵工作原理及特点	215
8.1.2	三种 DC/DC 转换器性能比较	220
8.2	新型单片电荷泵电源	223
8.2.1	AAT3110 电荷泵	223
8.2.2	MAX1759 电荷泵	224
8.2.3	低纹波电荷泵	227
8.2.4	电荷泵典型应用电路	236
8.2.5	低噪声、正向调节电荷泵	247
8.2.6	SP6682 稳压型电荷泵应用电路	248
8.2.7	LTC1983ES6—5 电荷泵应用电路	249
8.2.8	MAX202E 电荷泵应用电路	250
8.2.9	MAX5008 电荷泵应用电路	250
8.2.10	超低静态电流电荷泵	252
8.3	LED 灯驱动电路	253
8.3.1	LED 驱动电源	253
8.3.2	白光 LED 驱动器的选择	255
8.3.3	白光 LED 的驱动电路	259
8.3.4	LED 的控制电路	260
<b>第 9 章</b>	<b>单片开关电源的电磁兼容设计技术</b>	<b>268</b>
9.1	单片开关电源的电磁兼容性	268
9.1.1	电磁兼容技术名词	269
9.1.2	电磁兼容性的国内国外标准	270
9.1.3	单片开关电源的电磁兼容性	271
9.1.4	电磁兼容性研究及解决方法	272
9.2	单片开关电源电磁兼容性测试	277
9.2.1	EMC 测试技术	277



9.2.2	展望我国电磁兼容试验技术 .....	282
9.3	单片开关电源可靠性设计 .....	284
9.3.1	可靠性定义 .....	284
9.3.2	提高系统可靠性的途径 .....	287
9.3.3	单片开关电源电气可靠性设计 .....	293
9.3.4	电源设备可靠性热设计 .....	295
9.3.5	安全性设计 .....	298
9.4	开关电源的抗干扰设计 .....	301
9.4.1	开关电源的 EMC 设计 .....	301
9.4.2	电磁干扰的产生和传播方式 .....	303
9.5	EMC 的设计措施 .....	306
9.5.1	电磁干扰抑制方法 .....	306
9.5.2	接地技术 .....	310
9.5.3	屏蔽技术 .....	321
9.5.4	滤波技术 .....	326
9.5.5	元器件布局及印制电路板布线 .....	330
9.5.6	瞬态干扰抑制器 .....	331
9.5.7	物理隔离 .....	347
<b>第 10 章</b>	<b>单片电源 PCB 设计技术</b> .....	<b>349</b>
10.1	PCB 技术 .....	349
10.1.1	PCB 的功能与特点 .....	349
10.1.2	PCB 的分类 .....	352
10.2	PCB 设计 .....	353
10.2.1	PCB 设计流程 .....	354
10.2.2	PCB 布局设计 .....	355
10.2.3	飞线与 PCB 布局 .....	358
10.2.4	PCB 布线设计 .....	360
10.2.5	PCB 互连设计 .....	369
10.2.6	PCB 焊盘 .....	370
10.2.7	混合信号 PCB 的设计 .....	379
10.3	PCB 的可靠性设计 .....	381
10.3.1	地线设计 .....	381
10.3.2	抗干扰设计 .....	382
10.4	PCB 信号完整性与电磁兼容性设计 .....	388
10.4.1	信号完整性设计方法 .....	388
10.4.2	PCB 中带状线、电线、电缆之间的串音和电磁耦合 .....	395
10.4.3	PCB 电磁兼容设计要点 .....	399
10.4.4	高速 PCB 的电磁兼容 .....	400
10.4.5	射频产品 PCB 的电磁兼容设计 .....	402
10.4.6	开关电源 PCB EMC 辅助设计的软件方法 .....	407
10.4.7	PCB 分层堆叠在控制 EMI 辐射中的作用 .....	410
10.4.8	抑制电磁干扰的 PCB 设计和制造 Build-up 新技术 .....	412





10.5 PCB产品质量和可靠性评价 .....	416
附录 A 开关电源技术术语 .....	419
附录 B 中华人民共和国国家标准——电磁兼容术语 .....	429
附录 C PCB基本名词解释 .....	433
参考文献 .....	439

## 1.1 单片开关电源的发展

## 1.1.1 开关电源

电子装置小型轻量化的关键是供电电源的小型化,开关电源具有体积小、效率高等一系列优点,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。开关电源中的调整管工作于开关状态,必然存在开关损耗,而且损耗的大小随开关频率的提高而增加。另外,开关电源中的变压器、电感器等磁性元件及电容元件的损耗,也随频率的提高而增加,因此,需要尽可能地降低电源电路中的损耗。

目前,市场上开关电源中的功率管多采用双极型晶体管,开关频率可达几十千赫兹;采用 MOSFET 器件的开关电源转换频率可达几百千赫兹。为了提高开关电源的开关频率,必须采用高速开关器件,对于开关频率在兆赫以上的开关电源可利用谐振工作方式。谐振工作方式开关电源的开关损耗理论上为零,噪声也很小,采用谐振工作方式的兆赫级的开关电源目前已经实用化。

## 1. 开关电源的基本构成

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 转换器进行功率转换,是开关电源的核心部分,此外,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,然后误差电压经过放大及脉宽调制(PWM)电路后,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 1-2 是一种开关型稳压电源的原理电路。

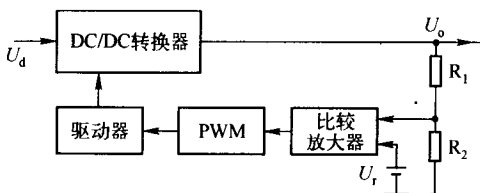


图 1-1 开关电源的基本构成

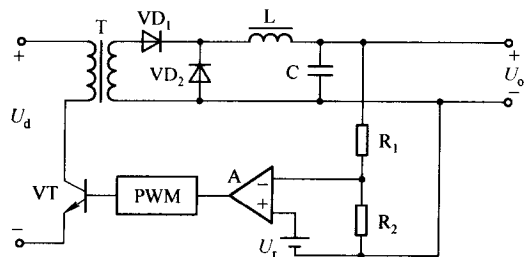


图 1-2 开关型稳压电源的原理电路



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

线性稳压电源的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,而开关电源的输入瞬态变化比较多地表现在输出端。在提高开关型稳压电源开关工作频率的同时,由于反馈放大器的频率特性得到改善,所以开关电源的瞬态响应特性也能得到改善。负载变化瞬态响应主要由输出端 LC 滤波器的特性决定,所以可以利用提高开关工作频率,降低输出滤波器 LC 体积的方法来改善开关电源的瞬态响应特性。

## 2. 开关稳压电源的优缺点

### (1) 开关稳压电源的优点

① 功耗小,效率高。在如图 1-2 所示的开关稳压电源电路中,开关晶体管在激励信号的激励下,交替地工作在导通—截止和截止—导通的开关状态,开关转换频率一般为 50 kHz 左右,在一些技术先进的国家中,开关转换频率可以达到几百千赫兹或近 1000 kHz。这使得开关晶体管的功耗很小,电源的效率可以大幅度地提高,其效率可达到 80%。

② 体积小,重量轻。从开关型稳压电源的原理图中可以清楚地看到,在电路结构上没有采用笨重的工频变压器。由于晶体管上的耗散功率大幅度降低后,又省去了较大的散热片,所以使开关型稳压电源实现了体积小,重量轻。

③ 稳压范围宽。开关型稳压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。所以开关型稳压电源的稳压范围很宽,稳压效果很好。此外,改变开关型稳压电源占空比的方法有脉宽调制型和频率调制型两种。因此,开关稳压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型稳压电源。

④ 滤波电容的容量和体积减小。目前,开关型稳压电源的工作频率基本上是在 50 kHz,是线性稳压电源的 1000 倍,这使整流后的滤波效率几乎也提高了 1000 倍。即使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,采用开关型稳压电源时,滤波电容的容量只是线性稳压电源中滤波电容的  $1/500 \sim 1/1000$ 。

⑤ 电路形式灵活多样。开关型稳压电源的电路形式有自激式和他激式,调宽型和调频型,单端式和双端式等,设计者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稳压电源。

### (2) 开关稳压电源的缺点

开关稳压电源的缺点是存在较为严重的开关干扰。在开关稳压电源中,功率调整晶体管工作在开关状态,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器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,就会严重地影响整机的正常工作。此外,由于开关稳压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,因此,开关稳压电源的造价不能进一步降低,影响到其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,开关稳压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稳压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,在我国还处于研究、开发阶段。在一些技术先进国家中,开关稳压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。这暴露出开关稳压电源的又一个缺点,那就是电路结构复杂、故障率高、维修麻烦。对此,如果设计者和制造者不予以充分重视,则它将直接影响到开关稳压电源的推广应用。当今,开关稳压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. 单片开关电源的分类

随着电子技术的发展和应用,人们对电子仪器和电子产品的要求是在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。这使开关稳压型电源在计算机、通信、航天、彩色电视机等方面都得到了越来越广泛的应用,这大大促进了开关稳压电源的发展,而从事这方面研究和生产的人员也在不断地增加,使得开关稳压电源的品种和类型也越来越多。目前,应用较广泛的几类开关型稳压电源的原理如图 1-3 所示。其电路结构按不同的分类方法可分为以下几类。

#### (1) 按激励方式分类

① 他激式开关稳压电源。他激式开关稳压电源的电路中设有激励信号的振荡器,电路形式如图 1-3(e)所示。

② 自激式开关稳压电源。自激式开关稳压电源的开关管兼作振荡器中的振荡管,其电路形式如图 1-3(f)所示。

#### (2) 按调制方式分类

① 脉宽调制型开关稳压电源。脉宽调制型开关稳压电源的振荡频率保持不变,其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 频率调制型开关稳压电源。频率调制型开关稳压电源的占空比保持不变,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 混合调制型开关稳压电源。混合调制型开关稳压电源是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幅度。

#### (3) 按开关管电流的工作方式分类

① 开关型稳压电源。开关型稳压电源利用开关晶体管把直流变成高频标准方波,电路形式类似于他激式。

② 谐振型稳压电源。谐振型稳压电源的开关晶体管与 LC 谐振回路将直流变成标准正弦波,电路形式类似于自激式。

#### (4) 按开关晶体管的类型分类

① 晶体管型开关稳压电源。晶体管型开关稳压电源采用晶体管作为开关管,其电路形式如图 1-3(d)所示。

② 晶闸管型开关稳压电源。晶闸管型开关稳压电源采用晶闸管作为开关管,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 1-3(c)所示。

#### (5) 按储能电感与负载的连接方式分类

① 串联型开关稳压电源。串联型开关稳压电源的储能电感串联在输入电压与输出电压之间,其电路形式如图 1-3(a)所示。

② 并联型开关稳压电源。并联型开关稳压电源的储能电感并联在输入电压与输出电压



之间,其电路形式如图 1-3(b)所示。

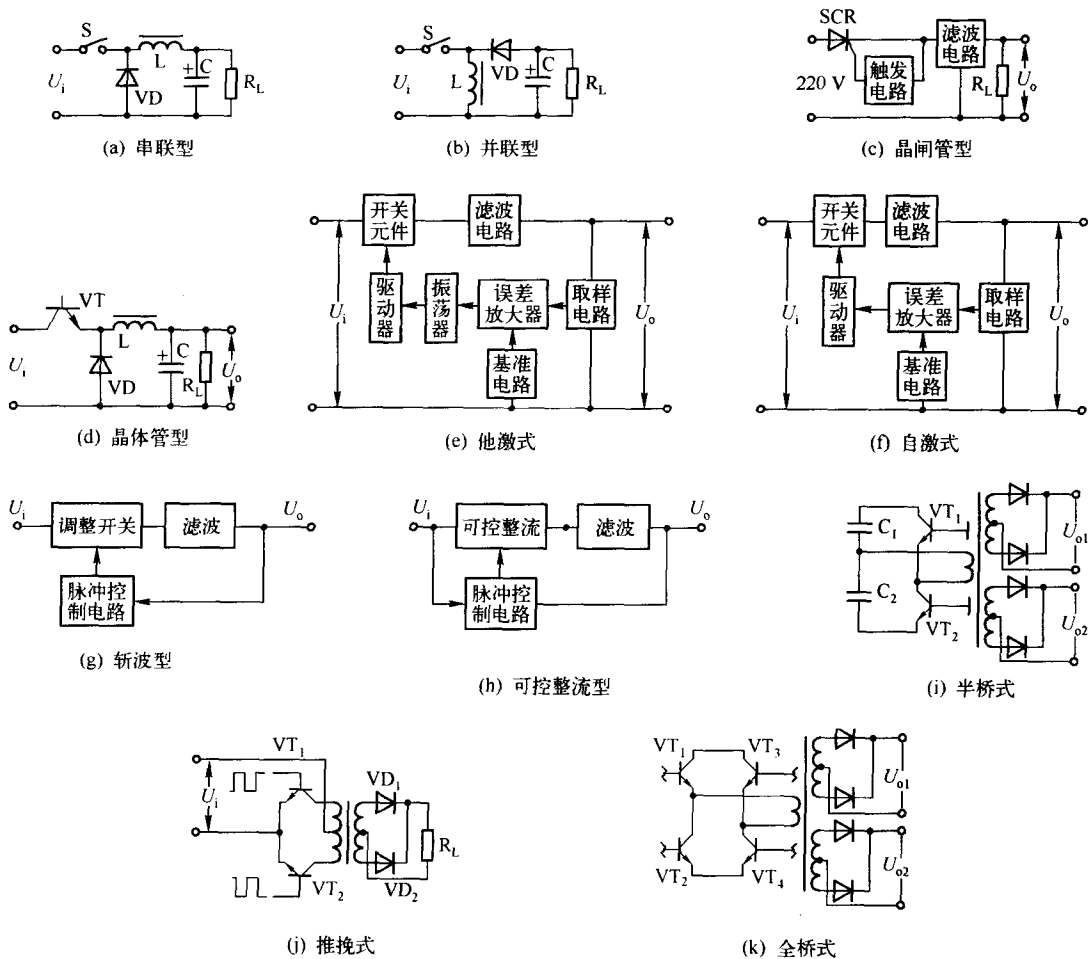


图 1-3 各种类型开关稳压电源的原理

(6) 按晶体管的连接方式分类

① 单端式开关稳压电源。单端式开关稳压电源仅使用一个晶体管作为电路中的开关管,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 1-3(a)、图 1-3(b)和图 1-3(d)所示。

② 推挽式开关稳压电源。推挽式开关稳压电源使用两个晶体管,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,其电路形式如图 1-3(j)所示。

③ 半桥式开关稳压电源。半桥式开关稳压电源使用两个晶体管,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。其电路形式如图 1-3(i)所示。

④ 全桥式开关稳压电源。全桥式开关稳压电源使用四个开关晶体管,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 1-3(k)所示。

(7) 按输入与输出的电压大小分类

① 升压式开关稳压电源。升压式开关稳压电源的输出电压比输入电压高,实际就是并联



型开关稳压电源。

② 降压式开关稳压电源。降压式开关稳压电源的输出电压比输入电压低,实际就是串联型开关稳压电源。

#### (8) 按工作方式分类

① 可控整流型开关稳压电源。所谓可控整流型开关稳压电源,是指采用晶闸管整流元件作为调整开关管,可由交流电网直接供电,也可用变压器变压后供电,这种供电方式在开关稳压电源刚兴起时常常被采用,目前基本上不太采用。在工作的半波内,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,其电路形式如图 1-3(h)所示。

② 斩波型开关稳压电源。斩波型开关稳压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 1-3(g)所示。

③ 隔离型开关稳压电源。隔离型开关稳压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,隔离型开关稳压电源采用直流供电,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。这种形式的开关稳压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 散件式开关稳压电源。散件式开关稳压电源电路都是采用分立元器件组成的,它的电路结构较为复杂,可靠性较差。

② 集成电路式开关稳压电源。集成电路式开关稳压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晶体管,有的则不包括开关晶体管。这种电源的特点是电路结构简单、调试方便、可靠性高。彩色电视机中常采用这种开关稳压电源。

以上阐述的开关稳压电源的品种都是从不同的角度,以开关稳压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、开关管器件的种类及串、并联结构等各不相同,但都可以归结为串联型开关稳压电源和并联型开关稳压电源。

## 1.1.2 开关电源控制方式

### 1. PWM 转换器

脉冲宽度调制(PWM)转换器就是通过重复通/断开关工作方式,把一种直流电压(电流)变换为高频方波电压(电流),再经过整流平波后变为另一种直流电压输出。PWM 转换器由功率开关管、整流二极管及滤波电路等元器件组成。当输入/输出之间需要进行电气隔离时,可采用变压器进行隔离和升、降压。PWM 转换器的工作原理如图 1-4 所示。由于开关工作频



率的提高,滤波电感 L、变压器 T 等磁性元件,以及滤波电容 C 都可以小型化。

对于 PWM 转换器,加在开关管 VT 两端的电压  $U_s$  及通过 VT 的电流  $I_s$  的波形近似为方波,如图 1-5 所示。

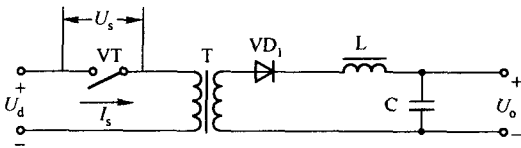


图 1-4 PWM 转换器的工作原理

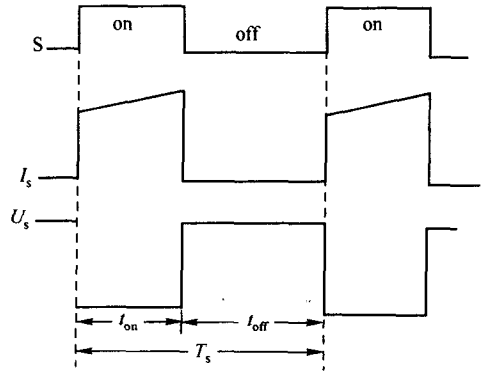


图 1-5 转换器开关工作的波形

对于这种转换器,有两种工作方式:一种是保持开关工作周期  $T_s$  不变,控制开关导通时间  $t_{on}$  的脉冲宽度调制(PWM)方式;另一种是保持导通时间  $t_{on}$  不变,改变开关工作周期  $T_s$  的脉冲频率调制(PFM)方式。

PWM 开关稳压或稳流电源基本工作原理就是在输入电压变化,内部参数变化,外接负载变化的情况下,控制电路通过被控制信号与基准信号的差值进行闭环反馈,调节主电路开关器件的导通脉冲宽度,使得开关电源的输出电压或电流等被控制信号稳定。PWM 的开关频率一般为恒定,控制取样信号有:输出电压、输入电压、输出电流、输出电感电压和开关器件峰值电流。由这些信号可以构成单环、双环或多环反馈系统,实现稳压、稳流及恒定功率的目的,同时可以实现一些附带的过流保护、抗偏磁和均流等功能。

一般来讲,正激型开关电源主电路可用图 1-6 所示的降压斩波器简化表示,  $U_g$  表示控制电路的 PWM 输出驱动信号。根据选用不同的 PWM 反馈控制模式,电路中的输入电压  $U_d$ 、输出电压  $U_o$ 、开关器件电流(由 b 点引出)、电感电流(由 c 点引出或 d 点引出)均可作为控制取样信号。输出电压  $U_o$  在作为控制取样信号时,通常经过图 1-6 所示的电路进行处理,得到电压信号  $U_e$ ,  $U_e$  再经处理或直接送入 PWM 控制器。图 1-7 中的电压误差运算放大器(e/a)的作用如下:

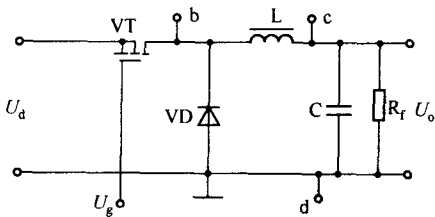


图 1-6 正激型开关电源主电路

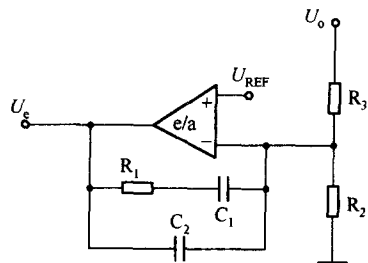


图 1-7 输出电压控制电路



① 将输出电压与给定电压  $U_{REF}$  的差值进行放大及反馈,保证在稳态时的稳压精度。该运放的直流放大增益理论上为无穷大,实际上为运放的开环放大增益。

② 将开关电源主电路输出端的附带有较宽频带开关噪声成分的直流电压信号,转变为具有一定幅值的、比较“干净”的直流反馈控制信号( $U_e$ ),即保留直流低频成分,衰减交流高频成分。因为开关噪声的频率较高、幅值较大,若高频开关噪声衰减不够的话,稳态反馈不稳;若高频开关噪声衰减过大的话,动态响应较慢。虽然互相矛盾,但是对电压误差运算放大器的基本设计原则仍是“低频增益要高,高频增益要低”。

③ 对整个闭环系统进行校正,使得闭环系统稳定工作。

## 2. 控制方式

脉宽调制(PWM)型开关稳压电源只对输出电压进行采样,实行闭环控制,这种控制方式属电压控制型,是一种单环控制系统。而电流控制型 DC/DC 开关转换器是在电压控制型的基础上,增加了电流反馈环,形成双环控制系统,使得开关电源的电压调整率、负载调整率和瞬态响应特性都有所提高,是目前较为理想的工作方式。

### (1) 电压控制型的基本原理

电压控制型原理如图 1-8 所示。电源输出电压  $U_o$  与参考电压  $U_{REF}$  比较放大,得到误差信号  $U_e$ ,再与斜坡信号比较后,PWM 比较器输出一定占空比的系列脉冲,这就是电压控制型的原理。其最大缺点是:在控制过程中电源电路内的电流值没有参与进去。因开关电源的输出电流是要流经电感的,故对于电压信号有  $90^\circ$  的相位延迟,然而对于稳压电源来说,应当考虑电流的大小,以适应输出电压的变化和负载的需求,从而达到稳定输出电压的目的,因此,仅采用输出电压采样的方法,其响应速度慢、稳定性差,甚至在大信号变化时,会产生振荡,造成功率管损坏等故障。

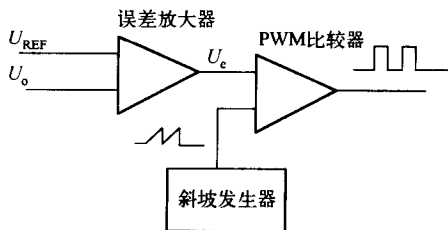


图 1-8 电压控制型原理

### (2) 电流控制型的基本原理

电流控制型正是针对电压控制型的缺点而发展起来的,从图 1-9 中可以看出,它除了保留电压控制型的输出电压反馈外,又增加了一个电流反馈环节。所谓电流控制型就是在脉宽比较器的输入端,将电流采样信号与误差放大器的输出信号进行比较,以此来控制输出脉冲的占空比,使输出的峰值电流跟随误差电压变化。

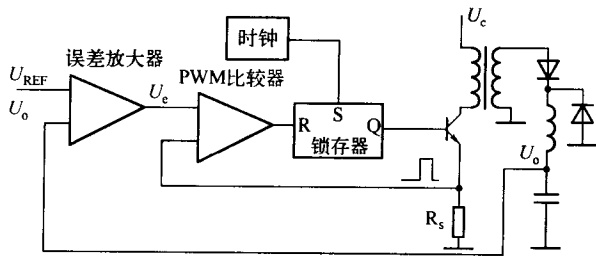


图 1-9 电流控制型原理

电流控制型的工作原理是:采用恒频时钟脉冲置位锁存器输出脉冲驱动功率管导通,使电源回路中的电流脉冲逐渐增大,当电流在采样电阻  $R_s$  上的幅度达到  $U_e$  时,脉宽比较器状态





翻转,锁存器复位,驱动撤除,功率管截止,这样逐个检测和调节电流脉冲,就可达到控制电源输出的目的。电流控制型的主要优点有:

① 线性调整率(电压调整率: $\leq 0.01\%$ )非常好,可与优良的线性稳压器相媲美,这是因为  $U_o$  的变化立即反映为电感电流的变化,它不经过误差放大器就能在比较器中改变输出脉冲宽度,再加一级输出电压  $U_o$ 。至误差放大器的控制,能使线性调整率更好。

② 明显地改善了负载调整率,因为误差放大器专门用于控制由于负载变化而造成的输出电压的变化。特别是使轻载时电压升高的幅度大大减少。从  $1/3$  负载至满载,负载调整率降至  $8\%$ ,  $2/3$  负载至满载,负载调整率降至  $3\%$  以下。

③ 简化了过流保护电路(电流限制电路)。由于  $R_s$  上感应出峰值电感电流,所以自然形成脉冲限流电路。这种峰值电感电流感应检测技术可以灵敏地、精确地限制最大输出电流,所以整个开关电源中的磁性元件(高频变压器)和功率元件(高压开关管)不必设计较大的裕量,就能保证稳压电源工作可靠,成本降低。

④ 误差放大器的外补偿电路简化,改善了频响,具有更大的增益——带宽乘积。由于电感电流是连续的,所以  $R_s$  上检测出的峰值电流能代表平均电流。整个电路可看做是一个误差电压控制电流源。转换器(误差放大器)的幅频特性由双极点变成单极点,因而,可以改善整个稳压器的特性。

### 3. 控制模式

现在开关稳压电源主要有五种 PWM 反馈控制模式。其输入电压、电流等信号在作为控制取样信号时,大多也需经过处理。针对不同的控制模式其处理方式也不同。下面以 VDMOS 开关器件构成的稳压正激型降压斩波器为例,说明五种 PWM 反馈控制模式的发展过程、基本工作原理、电路原理示意图、波形、特点及应用要点,以利于选择应用及仿真建模研究。

#### (1) 电压模式控制

图 1-10(a)为 BUCK 降压斩波器的电压模式控制 PWM 反馈系统原理图。电压模式控制是 20 世纪 60 年代后期,开关稳压电源刚刚开始发展而采用的第一种控制方法。该方法与一些必要的过电流保护电路相结合,至今仍然在工业界被广泛应用。电压模式控制只有一个电压反馈闭环,采用脉冲宽度调制法,即将电压误差放大器采样放大的慢变化的直流信号与恒定频率的三角波上的斜坡信号相比较,通过脉冲宽度调制原理,得到当时的脉冲宽度。其波形如图 1-10(a)所示。逐个脉冲的限流保护电路必须另外附加。当输入电压突然变小或负载阻抗突然变小时,因主电路中的输出电容  $C$  及电感  $L$  具有相移延时作用,而使输出电压的变小也延时滞后,检测到的输出电压变小的信号还要经过电压误差放大器的补偿电路,才能传至 PWM 比较器将脉宽展宽。主电路和控制电路的延时滞后作用是动态响应慢的主要原因。电压模式控制的优点有:

- ① PWM 三角波幅值较大,脉冲宽度调节时具有较好的抗噪声裕量;
- ② 占空比调节不受限制;
- ③ 对于多路输出电源,它们之间的交互调节效应较好;
- ④ 单一反馈电压闭环设计、调试比较容易;
- ⑤ 对输出负载的变化有较好的响应调节。