



电源系列丛书

单片开关电源

—应用电路·电磁兼容·PCB布线

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

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

电子工业出版社

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,系统地介绍了单片开关电源的发展、TOPSwitch 单片开关电源模块、TOPSwitch 单片开关电源应用电路、TinySwitch 单片开关电源模块、TinySwitch 单片开关电源应用电路、VICOR 单片开关电源应用电路、单片电荷泵电源应用电路、单片开关电源的系统设计及单片开关电源 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,具有很高的实用价值。

本书可供电子、信息、航天、军事及家电等领域从事单片开关电源开发、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. —北京:电子工业出版社,2004.9
(电源系列丛书)

ISBN 7-121-00169-1

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(2004)第 074946 号

责任编辑:富 军 特约编辑:张 律

印 刷:北京京科印刷有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:492.8 千字

印 次:2004 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

电源是各种电子设备必不可少的重要组成部分,其性能的优劣直接关系到整个电子系统的安全性和可靠性。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。单片开关电源以其低损耗、高效率及电路简洁等显著优点而受到人们的青睐,并广泛应用于计算机、电子设备、仪器仪表、通信设备及家用电器产品中。近年来,随着电子信息产业的高速发展,人们对单片开关电源的需求与日俱增,单片开关电源的开发、研制和生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。目前,伴随着单片开关电源的广泛应用,单片开关电源集成电路显示出了强大的生命力,其具有高集成度、高性能比及最简的外围电路、最佳的性能指标等特点,现已成为开发中小功率开关电源、精密开关电源及开关电源模块的优选集成电路。

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,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”,全面了解和掌握单片开关电源的设计和应用技术。

本书利用较小的篇幅对单片开关电源的抗干扰设计和单片开关电源 PCB 设计技术进行了介绍,可使读者对现代单片开关电源的抗干扰技术、PCB 设计技术有所了解,以此提高单片开关电源的可靠性和其他性能指标。

在本书写作过程中,无论是从资料的收集还是技术信息的交流上都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,书中错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 集成开关电源的发展	1
1.1.1 开关电源	1
1.1.2 开关电源控制方式	3
1.1.3 开关电源常用的电路类型	12
1.2 单片开关电源	15
1.2.1 单片开关电源的工作及反馈模式	15
1.2.2 三端单片开关电源	17
1.2.3 TinySwitch 系列四端开关电源	19
1.2.4 MC33370 系列五端单片开关电源	20
第 2 章 TOPSwitch 单片开关电源典型模块	23
2.1 TOPSwitch 单片开关电源系列产品	23
2.1.1 TOPSwitch 系列器件简介	23
2.1.2 TOPSwitch 产品分类及结构特点	25
2.2 TOPSwitch—II 系列器件	29
2.2.1 TOPSwitch—II 系列产品简介及内部结构	29
2.2.2 TOPSwitch—II 的性能特点	31
2.3 TOPSwitch—FX 系列	32
2.3.1 性能特点及芯片引脚功能	33
2.3.2 TOPSwitch—FX 的工作原理	35
2.3.3 TOPSwitch—FX 的设计要点	37
2.4 TOPSwitch—GX 系列	39
2.4.1 TOPSwitch—GX 的性能特点	39
2.4.2 TOPSwitch—GX 内部电路及引脚功能	41
2.4.3 TOPSwitch 系列产品性能比较	45
第 3 章 TOPSwitch 单片开关电源应用电路	50
3.1 TOPSwitch 单片开关电源的应用	50
3.1.1 TOPSwitch 在功率变换器中的设计与应用	50
3.1.2 TOPSwitch 设计时需注意的问题	55
3.2 TOPSwitch 应用电路	58
3.2.1 12 V、20 W 开关电源(TOP224P)	58
3.2.2 摄录像机的电池快速充电器	62
3.2.3 笔记本电脑电池充电器	63
3.3 PC 电源电路	64
3.3.1 PC 主电源	64
3.3.2 绿色 PC 电源	65
3.3.3 5 V 和 3.3 V 输出的 17 W PC 机待机电源	66
3.3.4 处理器控制开关的供电电源	67
3.4 通用高效电源电路	71

3.4.1	12.5 V/25 W 开关电源	71
3.4.2	7.5 V、1 A 恒压/恒流输出式开关电源	71
3.4.3	7.5 V/15 W 开关电源	75
3.4.4	70 W(19 V、3.6 A)通用开关电源	77
3.4.5	15 V/30 W 精密开关电源	78
3.4.6	250 W 通用开关电源	79
3.4.7	12 V/30 W 小功率开关电源	81
3.4.8	5 V/0.8 A 精密开关电源	83
3.4.9	120 W/24 V 开关电源的设计	84
3.4.10	4 W/5 V 开关型稳压电源	85
3.4.11	能进行外部限流的 12 V/30 W 开关电源	86
3.5	多路输出式开关电源	87
3.5.1	电路设计方案	88
3.5.2	多路输出式 25 W 开关电源	89
3.5.3	45 W 多路输出式开关电源	92
3.5.4	多路输出的 35W 机顶盒电源	94
3.5.5	20 W 双路输出(+5 V、+12 V)开关电源设计	95
3.5.6	双输出开关电源设计	97
3.6	TOPSwitch 在其他电路中的应用	100
3.6.1	TOPSwitch 在 PFC 中的应用	100
3.6.2	TOPSwitch 模块在功放电路中的应用	105
第 4 章	TinySwitch 单片开关电源典型模块	111
4.1	TinySwitch 单片开关电源	111
4.1.1	TinySwitch 简介	112
4.1.2	TinySwitch 工作原理	113
4.2	TinySwitch—II 单片开关电源	117
4.2.1	TinySwitch—II 的特性	117
4.2.2	TinySwitch—II 工作原理	120
第 5 章	TinySwitch 单片开关电源应用电路	128
5.1	TinySwitch 单片开关电源应用	128
5.2	TinySwitch 构成的充电器电路	131
5.2.1	2.5 W 恒流/恒压输出式手机电池充电器	131
5.2.2	5.2 V/3.6 W 移动电话充电器	132
5.3	PC 机待机与隔离电源实用电路	133
5.3.1	10 W 和 15 W 的 PC 机待机电源	133
5.3.2	隔离型待机电源	136
5.4	DVD 电源实用电路	136
5.4.1	DVD 播放机电源	136
5.4.2	18 W 功率 DVD 开关电源	137
第 6 章	VICOR 单片开关电源应用电路	140
6.1	软开关技术	140
6.1.1	硬开关问题分析	140
6.1.2	软开关的基本概念	141
6.1.3	软开关电路的分类	142

6.1.4	典型的软开关电路工作原理	144
6.2	VICOR 单片开关电源	148
6.2.1	VICOR 的工作原理	149
6.2.2	第二代 VICOR 性能特点	151
6.3	VICOR 典型应用电路	154
6.3.1	VICOR 应用电路	154
6.3.2	并联及 N+1 冗余应用电路	156
第 7 章	典型单片开关电源应用电路	162
7.1	PWM 开关调整器	162
7.1.1	PWM 开关调整器特征	162
7.1.2	典型应用电路	174
7.2	典型单片开关电源电路设计	178
7.2.1	TEA1520 系列单片开关电源	178
7.2.2	TDA1683x 系列单片开关电源	183
7.2.3	SG6848 单片开关电源特性及应用	185
第 8 章	单片电荷泵电源应用电路	187
8.1	电荷泵工作特性	187
8.1.1	电荷泵工作原理及特点	187
8.1.2	三种 DC/DC 变换器性能比较	192
8.2	新型单片电荷泵电源	195
8.2.1	AAT3110 电荷泵	195
8.2.2	MAX1759 单片电荷泵	197
8.2.3	低波纹电荷泵	199
8.2.4	电荷泵典型应用电路	209
第 9 章	单片开关电源的系统设计	220
9.1	单片开关电源外围器件的选择	220
9.1.1	单片开关电源功率计算	220
9.1.2	单片开关电源外围元器件的选用	222
9.1.3	单片开关电源高频变压器的设计	239
9.2	开关电源的抗干扰设计	242
9.2.1	开关电源的 EMC 设计	242
9.2.2	电磁干扰的产生和传播方式	244
9.3	EMC 的设计措施	247
9.3.1	电磁干扰抑制方法	247
9.3.2	接地技术	251
9.3.3	屏蔽技术	252
9.3.4	滤波技术	253
9.3.5	元器件布局及印制电路板布线	257
9.3.6	瞬态干扰及抑制技术	258
第 10 章	单片开关电源 PCB 设计技术	262
10.1	PCB 技术	262
10.1.1	PCB 的分类	262
10.1.2	PCB 中带状线、电线、电缆间的串音和电磁耦合	263

10.2 PCB 设计	265
10.2.1 PCB 布局、布线设计	265
10.2.2 印制电路板的可靠性设计	270
10.2.3 开关电源印制板 EMC 辅助设计的软件方法	272
10.3 PCB 信号完整性设计	275
10.3.1 确保信号完整性的电路板设计准则	275
10.3.2 PCB 分层堆叠在控制 EMI 辐射中的作用	278
10.3.3 抑制电磁干扰的 PCB 设计和制造 Build-up 新技术	281
附录 A 单片开关电源技术术语	285
参考文献	296

第 1 章 概 述

1.1 集成开关电源的发展

开关电源被誉为高效节能电源,代表着稳压电源的发展方向,现已成为稳压电源的主流产品。近 20 多年来,集成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)及尤尼特德公司(Unitrode)等相继推出一批 PWM 芯片,典型产品有 MC3520、SG3524 和 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 和 UC1864。第二个方向则是对中、小功率开关电源实现单片集成化。它的发展大致分为两个阶段: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、功率输出级及保护电路等集成在一个芯片中,使用时需配置工频变压器与电网隔离,适于制作低压输出(5.1~40 V)、大中功率(400 W 以下)、大电流(1.5~10 A)及高效率(可超过 90%)的开关电源。

1.1.1 开关电源

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。

电子装置小型轻量化的关键是供电电源的小型化,因此需要尽可能地降低电源电路中的损耗。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。另一方面,开关电源中的变压器、电抗器等磁性元件及电容元件的损耗,也随频率的提高而增加。

目前,市场上开关电源中功率管多采用双极型晶体管,开关频率可达几十千赫;采用 MOSFET 的开关电源转换频率可达几百千赫,为提高开关频率必须采用高速开关器件。对于兆赫级以上开关频率的电源则可利用谐振电路,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,且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。采用谐振开关方式的兆赫级变换器已经实用化。

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 变换器可进行功率转换,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(R1、R2)检测输出电压变化,与基准电压 U_r 进行比较,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 1-2 是一种开关电源电路的实现形式。

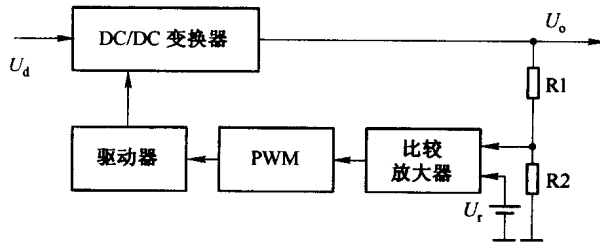


图 1-1 开关电源的基本构成

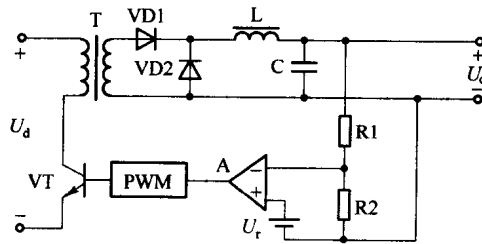


图 1-2 开关电源电路的实现形式

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。

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。

2. 开关电源的分类

开关电源的电路结构有多种,通常按以下方式进行分类。

(1) 驱动方式

开关电源按驱动方式分为自励式和他励式。

(2) 工作方式

开关电源按 DC/DC 变换器的工作方式可分为:

- ① 单端正励式和反励式、推挽式、半桥式、全桥式等;
- ② 降压型、升压型和升降压型等。

(3) 电路组成

开关电源按电路组成可分为谐振型和非谐振型。

(4) 控制方式

开关电源按控制方式可分为:

- ① 脉冲宽度调制(PWM)式;
- ② 脉冲频率调制(PFM)式;
- ③ PWM 与 PFM 混合式。

(5) 隔离和信号耦合方式

按电源是否隔离和反馈控制信号耦合方式,开关电源可分为隔离式、非隔离式和变压器耦合式、光电耦合式等。

以上这些方式的组合可构成多种方式的开关电源。因此设计者需根据各种方式的特征进行有效地组合,制作出满足实际需要的高质量开关电源。

1.1.2 开关电源控制方式

1. 脉冲宽度调制(PWM)变换器

脉冲宽度调制(PWM)变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的器件。PWM 变换器由功率开关管、整流二极管及滤波电路等元器件组成。输入输出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 变换器的工作原理如图 1-3 所示。由于开关工作频率的提高,滤波电感 L、变压器 T 等磁性元件及滤波电容 C 等都可以小型化。

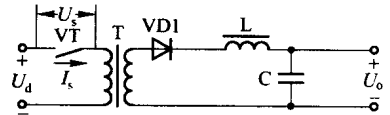


图 1-3 PWM 变换器的工作原理

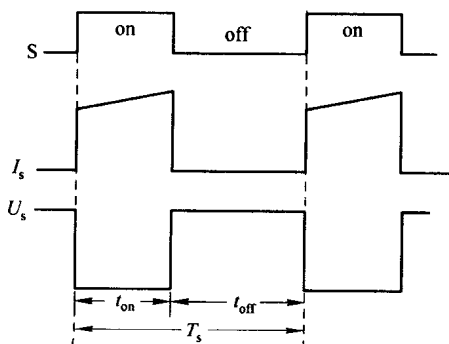


图 1-4 变换器开关工作的波形

对于 PWM 变换器,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 1-4 所示。

PWM 变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、输出电感电压及开关器件峰值电流。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、抗偏磁及均流等功能。

一般来讲,正激型开关电源主电路可用如图 1-5 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)均可作为取样控制信号。输出电压 U_o 在作为控制取样信号时,通常经过如图 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。

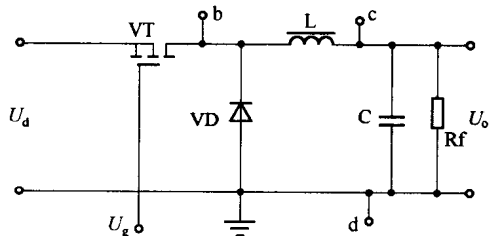


图 1-5 正激型开关电源主电路

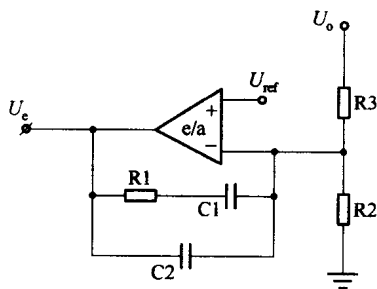


图 1-6 输出电压控制电路图

如图 1-6 所示中的电压运算放大器(e/a)有下列三种作用。

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,如高频开关噪声衰减不够的话,则稳态反馈不稳;如高频开关噪声衰减过大,则动态响应较慢。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,这种控制方式属于电压控制型,是一种单环控制系统。而电流控制型 DC/DC 开关变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

电压控制型的原理如图 1-7 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,控制过程中电源电路内的电流值没有参与进去。众所周知,开关电源

的输出电流是要流经过电感的,故对于电压信号有 90° 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。

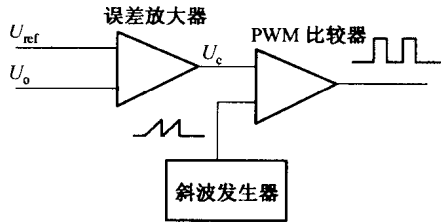


图 1-7 电压控制型的原理

(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 1-8 所示可以看到,它除保留了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。

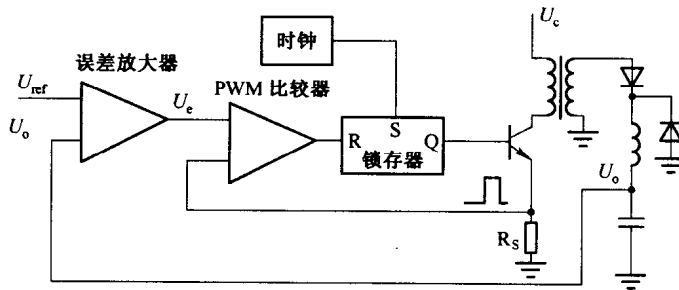


图 1-8 电流控制型的原理

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,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如下。

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媲美。这是因为 U_e 的变化可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。变换器(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

目前,开关电源主要有 5 种 PWM 反馈控制模式,其输入电压、电流等信号在作为取样控制信号时,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 5 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 PWM

图 1-9(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 PWM 是 20 世纪 60 年代后期开关稳压电源刚刚开始发展时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,至今仍然在工业界得到很广泛的应用。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,如图 1-9(a)中波形所示。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,因为主电路有较大的输出电容 C 及电感 L 的相移延时作用,输出电压的变小也延时滞后,输出电压变小的信息还要经过电压误差放大器的补偿电路延时滞后,才能传至 PWM 比较器将脉宽展宽。这两个延时滞后作用是动态响应慢的主要原因。

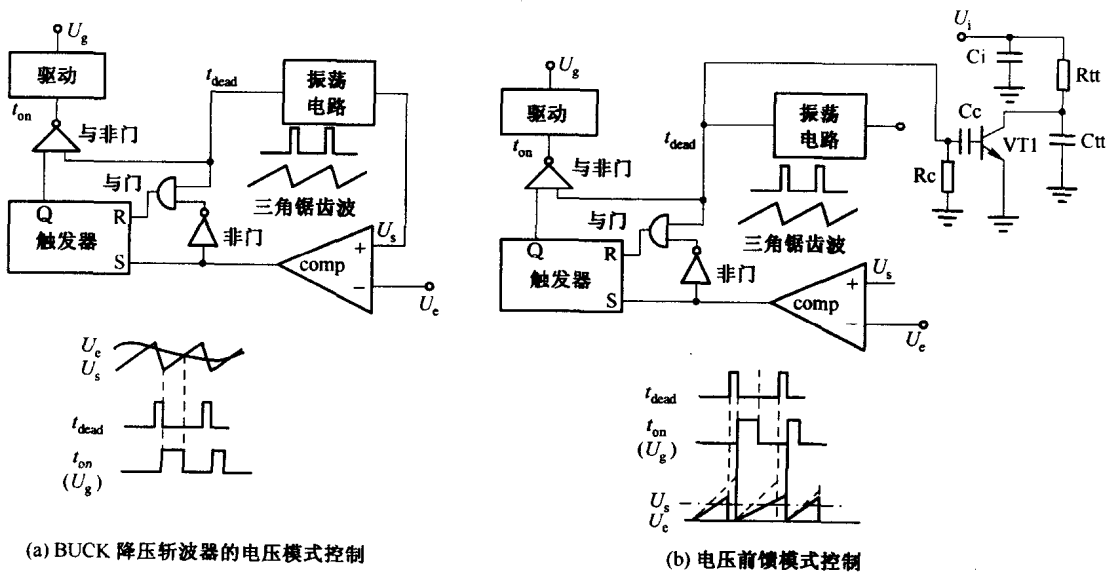


图 1-9 电压模式控制 PWM 原理图

电压模式控制的优点:

- 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。

电压模式控制的缺点:

- ① 对输入电压的变化动态响应较慢;
- ② 补偿网络设计本来就较为复杂,闭环增益随输入电压而变化使其更为复杂;
- ③ 输出 LC 滤波器给控制环增加了双极点,在补偿设计误差放大器时,需要将主极点低频衰减,或者增加一个零点进行补偿;
- ④ 在控制磁心饱和故障状态方面较为复杂。

改善和加快电压模式控制动态响应速度的方法有两种。一种方法是增加电压误差放大器的带宽,保证具有一定的高频增益。但是这样容易受高频开关噪声干扰的影响,需要在主电路及反馈控制电路上采取措施进行抑制或同相位衰减平滑处理。另一种方法是采用电压前馈模式控制 PWM 技术,原理如图 1-9(b)所示。用输入电压对电阻电容(R_{tt} 、 C_{tt})充电产生具有可变化的上斜坡的三角波取代传统电压模式控制 PWM 中振荡器产生的固定三角波。此时输入电压变化能立刻在脉冲宽度的变化上反映出来,因此该方法对输入电压的变化引起的动态响应速度明显提高。对输入电压的前馈控制是开环控制,而对输出电压的控制是闭环控制,目的是增加对输入电压变化的动态响应速度。这是一个由开环和闭环构成的双环控制系统。

(2) 峰值电流模式控制 PWM

峰值电流模式控制简称电流模式控制。它的概念在 20 世纪 60 年代后期来源于原边具有电流保护功能的单端自激式反激开关电源。在 20 世纪 70 年代后期才从学术上做深入地建模研究。直至 20 世纪 80 年代初期,第一批电流模式控制 PWM 集成电路(UC3842、UC3846)的出现使得电流模式控制迅速推广应用,主要用于单端及推挽电路。近年来,由于大占空比时所必需的同步不失真斜坡补偿技术实现上的难度及抗噪声性能差,电流模式控制面临着改善性能后的电压模式控制的挑战。如图 1-10 所示,误差电压信号 U_e 送至 PWM 比较器后,并不是像电压模式那样与振荡电路产生的固定三角波状电压斜坡比较,而是与一个变化的其峰值代表输出电感电流峰值的三角状波形或梯形尖角状合成波形信号 U_{Σ} 比较,然后得到 PWM 脉冲关断时刻。因此峰值电流模式控制不是用电压误差信号直接控制 PWM 脉冲宽度,而是直接控制峰值输出侧的电感电流大小,然后间接地控制 PWM 脉冲宽度。

电流模式控制是一种固定时钟开启峰值电流关断的控制方法,因为峰值电感电流容易传感,而且在逻辑上与平均电感电流大小变化相一致。但是,峰值电感电流的大小不能与平均电感电流大小一一对应,因为在占空比不同的情况下,相同的峰值电感电流的大小可以对应不同的平均电感电流大小。而平均电感电流大小才是惟一决定输出电压大小的因素。在数学上可以证明,将电感电流下斜坡斜率的至少一半以上斜率加在实际检测电流的上斜坡上,可以去除不同占空比对平均电感电流大小的扰动作用,使得所控制的峰值电感电流最后收敛于平均电感电流。因而合成波形信号 U_{Σ} 由斜坡补偿信号与实际电感电流信号两部分构成。当外加补偿斜坡信号的斜率增加到一定程度,峰值电流模式控制就会转化为电压模式控制。因为若将

斜坡补偿信号完全用振荡电路的三角波代替,就成为电压模式控制,只不过此时的电流信号可以认为是一种电流前馈信号,如图 1-10 所示。当输出电流减小,峰值电流模式控制就从原理上趋向于变为电压模式控制。当处于空载状态,输出电流为零并且斜坡补偿信号幅值比较大的话,峰值电流模式控制实际上就变为电压模式控制了。

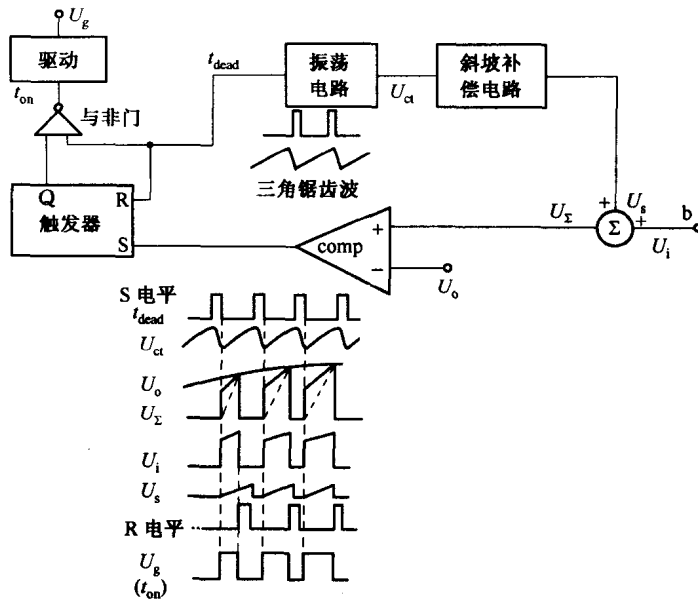


图 1-10 峰值电流模式控制 PWM 原理图

峰值电流模式控制 PWM 是双闭环控制系统,即电压外环控制和电流内环控制。电流内环是瞬时快速按照逐个脉冲工作的。功率级是由电流内环控制的电流源,而电压外环控制此功率级电流源。在该双环控制中,电流内环只负责输出电感的动态变化,因而电压外环仅需控制输出电容,不必控制 LC 储能电路。由于这些原因,峰值电流模式控制 PWM 具有比电压模式控制大得多的带宽。

峰值电流模式控制 PWM 的优点:

- ① 暂态闭环响应较快,对输入电压的变化和输出负载的变化的动态响应均快;
- ② 控制环易于设计;
- ③ 输入电压的调整可与电压模式控制的输入电压前馈技术相媲美;
- ④ 简单自动的磁通平衡功能;
- ⑤ 瞬时峰值电流限流功能,即内在固有的逐个脉冲限流功能;
- ⑥ 自动均流并联功能。

峰值电流模式控制 PWM 的缺点:

- ① 占空比大于 50% 时开环不稳定性,存在难以校正的峰值电流与平均电流的误差;
- ② 闭环响应不如平均电流模式控制理想;
- ③ 容易发生次谐波振荡,即使占空比小于 50%,也有发生高频次谐波振荡的可能性,因而需要斜坡补偿;
- ④ 对噪声敏感,抗噪声性差,因为电感处于连续储能电流状态,与控制电压编程决定的电

流电平相比较,开关器件的电流信号的上斜坡通常较小,电流信号上的较小的噪声就很容易使得开关器件改变关断时刻,使系统进入次谐波振荡;

- ⑤ 电路拓扑受限制;
- ⑥ 对多路输出电源的交互调节性能不好。

(3) 平均电流模式控制 PWM

平均电流模式控制概念产生于20世纪70年代后期。平均电流模式控制 PWM 集成电路出现在20世纪90年代初期,成熟应用于20世纪90年代后期的高速 CPU 专用的具有高 di/dt 动态响应供电能力的低电压大电流开关电源。图 1-11(a)为平均电流模式控制 PWM 的原理图。将误差电压 U_e 接至电流误差信号放大器(c/a)的同相端,作为输出电感电流的控制编程电压信号 $U_{cp}(U_{current-program})$ 。带有锯齿纹波状分量的输出电感电流信号 U_d 接至电流误差信号放大器(c/a)的反相端,代表跟踪电流编程信号 U_{cp} 的实际电感平均电流。 U_d 与 U_{cp} 的差值经过电流放大器(c/a)放大后,得到平均电流跟踪误差信号 U_{ca} ,再由 U_{ca} 及三角锯齿波信号 U_i 或 U_s 通过比较器比较得到 PWM 关断信号。 U_{ca} 的波形与电流波形 U_i 反相,所以是由 U_{ca} 的下斜坡(对应于开关器件导通时期)与三角波 U_i 或 U_s 的上斜坡比较产生关断信号。显然,这就无形中增加了一定的斜坡补偿。为了避免次谐波振荡, U_{ca} 的上斜坡不能超过三角锯齿波信号 U_i 或 U_s 的上斜坡。

平均电流模式控制的优点:

- ① 平均电感电流能够高度精确地跟踪电流编程信号;
- ② 不需要斜坡补偿;
- ③ 调试好的电路抗噪声性能优越;
- ④ 适合于任何电路拓扑对输入或输出电流的控制;
- ⑤ 易于实现均流。

平均电流模式控制的缺点:

- ① 电流放大器在开关频率处的增益有最大限制;
- ② 双闭环放大器带宽、增益等配合参数设计调试复杂。

图 1-11(b)为增加输入电压前馈功能的平均电流模式控制,非常适合输入电压变化幅度大、变化速度快的中国电网情况。澳大利亚 R-T 公司的 48 V/100 A 采用半桥整流电路的通信开关电源模块实际上采用了如图 1-11(b)所示的控制方式。

(4) 滞环电流模式控制 PWM

滞环电流模式控制 PWM 为变频调制,也可以为定频调制。图 1-12 为变频调制的滞环电流模式控制 PWM。将电感电流信号与两个电压值比较,第一个较高的控制电压值 $U_c(U_c = U_e)$ 由输出电压与基准电压的差值放大得到,它控制开关器件的关断时刻;第二个较低电压值 U_{ch} 由控制电压 U_c 减去一个固定电压值 U_h 得到, U_h 为滞环带, U_{ch} 控制开关器件的开启时刻。滞环电流模式控制是由输出电压值 U_o 、控制电压值 U_c 及 U_{ch} 三个电压值确定的一个稳定状态,比电流模式控制多一个控制电压值 U_{ch} ,去除了发生次谐波振荡的可能性。

滞环电流控制模式的优点:

- ① 不需要斜坡补偿;
- ② 稳定性好,不容易因噪声发生不稳定振荡。

滞环电流控制模式的缺点: