

第 1 章 单片开关电源概述

单片开关电源自 20 世纪 90 年代中期问世以来,便显示出强大的生命力,并以其优良特性倍受人们的青睐。目前,它已成为开发国际通用的高效率中、小功率开关电源的优选 IC,也为新型开关电源的推广和普及创造了条件。本章首先阐述开关电源的发展趋势和基本工作原理,然后简要介绍单片开关电源的产品分类、主要特点、工作模式及反馈电路类型,最后给出几种单片开关电源典型产品的技术指标。

1.1 开关电源的发展趋势

电源是各种电子设备必不可缺的组成部分,其性能优劣直接关系到电子设备的技术指标及能否安全可靠地工作。目前常用的直流稳压电源分线性电源和开关电源两大类。线性稳压电源亦称串联调整式稳压电源,其稳压性能好,输出纹波电压很小,但它必须使用笨重的工频变压器与电网进行隔离,并且调整管的功率损耗较大,致使电源的体积和重量大、效率低。开关电源 SPS(Switching Power Supply)被誉为高效节能电源,它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。开关电源内部关键元器件工作在高频开关状态,本身消耗的能量很低,电源效率可达 80%~90%,比普通线性稳压电源提高近一倍。开关电源亦称无工频变压器的电源,它是利用体积很小的高频变压器来实现电压变换及电网隔离的,不仅能去掉笨重的工频变压器,还可采用体积较小的滤波元件和散热器,这就为研究与开发高效率、高密度、高可靠性、体积小、重量轻的开关电源奠定了基础。

1.1.1 开关电源的发展历史

开关电源已有几十年的发展历史。早期产品的开关频率很低,成本昂贵,仅用于卫星电源等少数领域。20 世纪 60 年代出现过晶闸管(旧称可控硅)相位控制式开关电源,70 年代由分立元件制成的各种开关电源,均因效率不够高、开关频率低、电路复杂、调试困难而难于推广,使之应用受到限制。70 年代后期以来,随着集成电路设计与制造技术的进步,各种开关电源专用芯片大量问世,这种新型节能电源才重获发展。目前,开关频率已从 20kHz 左右提高到几百千赫至几兆赫。与此同时,供开关电源使用的元器件也获得长足发展。MOS 功率开关管(MOS-FET)、肖特基二极管(SBD)、超快恢复二极管(SRD)、瞬态电压抑制器(TVS)、压敏电阻器(VSR)、熔断电阻器(FR)、自恢复保险丝(RF)、线性光耦合器、可调式精密并联稳压器(TL431)、电磁干扰滤波器(EMI Filter)、高导磁率磁性材料、由非晶合金制成的磁珠(magnetic bead)、三重绝缘线(Triple Insulated Wire)、玻璃珠(glass beads)胶合剂等一大批新器件、新材料正被广泛采用。所有这些,都为开关电源的推广与普及提供了必要条件。

1.1.2 单片开关电源的发展趋势

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。1977 年国外首先研制成功脉宽调制(PWM)控制器集成电

路,美国摩托罗拉(Motorola)公司、硅通用(Silicon General)公司、尤尼特德(Unitrode)公司等相继推出一批 PWM 芯片,典型产品有 MC3520、SG3524、UC3842。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: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 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,使用时需配工频变压器与电网隔离,适于制作低压连续可调式输出(5.1~40V)、大中功率(400W 以下)、大电流(1.5~10A)、高效率(可超过 90%)的开关电源。但从本质上讲,它仍属于 DC/DC 电源变换器。

1994 年,美国电源集成公司(Power Integrations Inc,简称 PI 公司或 Power 公司)在世界上首先研制成功三端隔离、脉宽调制型反激式单片开关电源,被人们誉为“顶级开关电源”。其第一代产品为 TOPSwitch 系列,第二代产品则是 1997 年问世的 TOPSwitch—Ⅰ 系列。该公司于 1998 年又推出了高效率、小功率、低价格的四端单片开关电源 TinySwitch 系列,并于 1999 年开发出 TNY256 系列新产品。在这之后, Motorola 公司于 1999 年新推出 MC33370 系列五端单片开关电源,亦称高压功率开关调节器(High Voltage Power Switching Regulator)。2000 年初,PI 公司又研制出 TOPSwitch—FX 系列五端单片开关电源,充分展示出单片开关电源蓬勃发展的新局面和良好的应用前景。目前,单片开关电源已形成具有六大系列、67 种型号的产品。

单片开关电源属于 AC/DC 电源变换器。以 TOPSwitch—Ⅰ 系列为例,它内部包含控制电压源、带隙基准电压源、振荡器、并联调整器/误差放大器、脉宽调制器、门驱动级、高压功率开关管(MOSFET)、过流保护电路、过热保护及上电复位电路、关断/自动重新启动电路和高压电流感测电路。芯片的集成度很高,外围电路简单,通过输入整流滤波器,适配 85~265V、47~440Hz 的交流电,可构成世界通用的各种开关电源或电源模块。它在价格上完全可以和同等功率的线性稳压电源相竞争,而电源效率显著提高,体积和重量则大为减小。单片开关电源的迅速发展与应用,使人们多年来所追求的高性价比、无工频变压器式开关电源变成现实。

1.2 开关电源的基本原理

目前生产的开关电源大多采用脉宽调制方式,少数采用脉冲频率调制或混合调制方式。下面对开关电源控制方式及脉宽调制的基本原理作简要介绍。

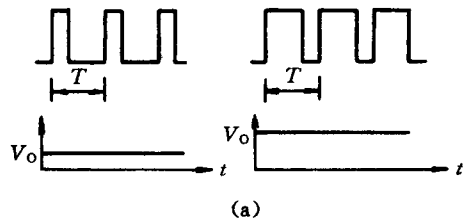
1.2.1 开关电源的控制方式

无工频变压器开关电源的控制方式,大致有以下三种:

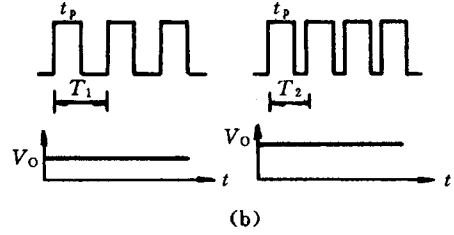
(1) 脉冲宽度调制方式,简称脉宽调制(Pulse Width Modulation,缩写为 PWM)式。其特点是固定开关频率,通过改变脉冲宽度来调节占空比。因开关周期也是固定的,这就为设计滤波电路提供了方便。其缺点是受功率开关管最小导通时间的限制,对输出电压不能作宽范围调节;另外输出端一般要接假负载(亦称预负载),以防止空载时输出电压升高。目前,集成开关电源大多采用 PWM 方式。

(2) 脉冲频率调制方式,简称脉频调制(Pulse Frequency Modulation,缩写为 PFM)式。它是将脉冲宽度固定,通过改变开关频率来调节占空比的。在电路设计上要用固定脉宽发生器来

代替脉宽调制器中的锯齿波发生器,并利用电压/频率转换器(例如压控振荡器 VCO)改变频率。其稳压原理是:当输出电压 V_O 升高时,控制器输出信号的脉冲宽度不变而周期变长,使占空比减小, V_O 降低。PFM 式开关电源的输出电压调节范围很宽,输出端可不接假负载。



PWM 方式和 PFM 方式的调制波形分别如图 1.2.1(a)、(b)所示, t_p 表示脉冲宽度(即功率开关管的导通时间 t_{ON}), T 代表周期。从中很容易看出二者的区别。但它们也有共同之处:① 均采用时间比率控制(TRC)的稳压原理,无论是改变 t_p 还是 T ,最终调节的都是脉冲占空比。尽管采用的方式不同,但控制目标一致,可谓殊途同归。② 当负载由轻变重,或者输入电压从高变低时,分别通过增加脉宽、升高频率的方法,使输出电压保持稳定。



(a) PWM 方式;(b) PFM 方式

图 1.2.1 两种控制方式的调制波形

(3) 混合调制方式,是指脉冲宽度与开关频率均不固定,彼此都能改变的方式,它属于 PWM 和 PFM 的混合方式。由于 t_p 和 T 均可单独调节,因此占空比调节范围最宽,适合制作供实验室使用的输出电压可以宽范围调节的开关电源。

1.2.2 脉宽调制式开关电源的基本原理

脉宽调制式开关电源的基本原理如图 1.2.2 所示。交流 220V 输入电压经过整流滤波后变成直流电压 V_1 ,再由功率开关管 VT(或 MOSFET)斩波、高频变压器 T 降压,得到高频矩形波电压,最后通过输出整流滤波器 VD、 C_2 ,获得所需要的直流输出电压 V_O 。脉宽调制器是这类开关电源的核心,它能产生频率固定而脉冲宽度可调的驱动信号,控制功率开关管的通断状态,来调节输出电压的高低,达到稳压目的。锯齿波发生器提供时钟信号。利用误差放大器和 PWM 比较器构成闭环调节系统。假如由于某种原因致使 $V_O \downarrow$,脉宽调制器就改变驱动信号的脉冲宽度,亦即改变占空比 D ,使斩波后的平均值电压升高,导致 $V_O \uparrow$ 。反之亦然。

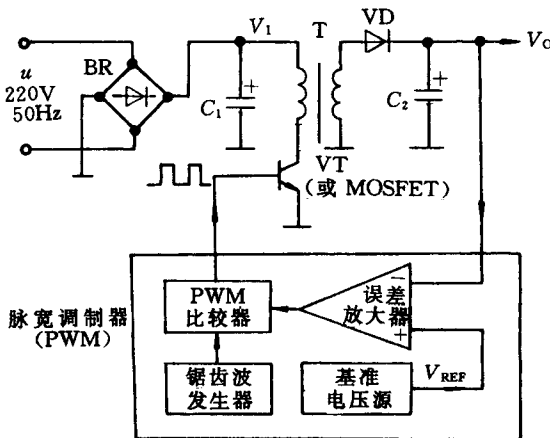


图 1.2.2 脉宽调制式开关电源的基本原理图

1.3 单片开关电源的产品分类及主要特点

目前生产的单片开关电源主要有 TOPSwitch、TOPSwitch—Ⅱ、TinySwitch、TNY256、MC33370、TOPSwitch—FX 六大系列；此外，还有 L4960 系列、L4970/L4970A 系列单片开关式稳压器，共八大系列、80 余种型号。其中，TOPSwitch、TOPSwitch—Ⅱ、TinySwitch、TNY256 和 TOPSwitch—FX 系列，均为美国 PI 公司产品；MC33370 系列是摩托罗拉 (Motorola) 公司产品；L4960、L4970/L4970A 系列为意-法半导体有限公司 (SGS-Thomson) 产品。根据引出端的数量，可划分成三端、四端、五端、多端共 4 种。

单片开关电源的产品分类及主要特点详见表 1.3。表中型号尾缀 Y(T、TV)代表 TO-220 封装，P 代表双列直插式封装，G 表示表面安装式封装。在生产厂家一栏中，括号内数字为该产品开始推向市场的年代。L4960 系列是在 80 年代中期问世的，而 L4970 和 L4970A 系列则是在 90 年代推出的第二代单片开关式集成稳压器，最大输出功率提高到 400W (L4960 系列仅为 160W)。

表 1.3 单片开关电源产品分类及主要特点

系列名称	产品型号	主要特点	生产厂家
TOPSwitch	TOP100Y~TOP104Y	属于三端单片开关电源的第一代产品，它首次将 PWM 控制系统的全部功能集成在芯片中，3 个引出端分别为控制端 C、源极 S、漏极 D。能构成 60W 以下无工频变压器的隔离式开关电源。除 TOP100Y~TOP104Y 内部功率开关管 (MOSFET) 耐压 350V，其余耐压均为 700V	PI 公司 (1994~1997 年)
	TOP200Y~TOP204Y TOP214Y		
	TOP209P、TOP210P TOP209G、TOP210G		
TOPSwitch—Ⅱ	TOP221P~TOP224P TOP221G~TOP224G TOP221Y~TOP227Y	是三端单片开关电源的第二代产品，内部功率开关管的耐压值均提高到 700V。适宜构成 150W 以下的普通型和精密型开关电源及电源模块	PI 公司 (1997 年)
TinySwitch	TNY253P~TNY255P TNY253G~TNY255G	属于四端小功率、低成本单片开关电源，比 TOPSwitch 增加了使能端 EN，利用此端可从外部关断功率 MOSFET，并以跳过时钟周期的方式来调节负载两端的电压，达到稳压目的。它用开/关控制器来代替 PWM 调制器，并可等效为脉冲频率调制器 (PFM)。其外围电路简单，适宜构成 10W 以下的电池充电器、电源适配器和待机电源	PI 公司 (1998 年)

续表

系列名称	产品型号	主要特点	生产厂家
TNY256	TNY256P/G/Y	是 TinySwitch 系列四端单片开关电源的改进产品,新增加了自动重启计数器 and 输入欠压检测电路,使保护功能更加完善。利用开关频率抖动特性,可降低电磁干扰。能构成 19W 以下的低成本开关电源,是传统小功率线性稳压电源理想的替代品	PI 公司 (1999 年)
MC33370	MC33369P~MC33373AP MC33369T~MC33374T MC33369TV~MC33374TV	属于五端单片开关电源,5 个引出端分别为工作电源电压输入端 V _{CC} ,反馈端 FB,地 GND,漏极 D,状态控制端 SCI。与 TOPSwitch 相比,增加了欠压锁定电路、外部关断电路和可编程状态控制器,能以多种方式控制开关电源的状态。在构成测试系统的电源时,能配微控制器(MCU)对电源进行关断操作。可构成 150W 以下的高效、隔离式开关电源	Motorola 公司 (1999 年)
TOPSwitch—FX	TOP232P~TOP234P TOP232G~TOP234G TOP232Y~TOP234Y	属于五端单片开关电源新产品,具有多功能、使用灵活、效率高等优点。与 TOPSwitch—II 相比,主要增加了下述功能:从外部可设定极限电流值,线路欠压检测,过压保护,频率抖动,半频选择,遥控开/关。其性能优于 MC33370 系列。适配晶体管和光耦合器,对开关电源进行遥控。在构成彩色喷墨打印机、激光打印机、机顶盒的电源时,能用微控制器来控制开关电源的通、断。若将多功能端 M、开关频率选择端 F 均与源极 S 短路,就变成三端单片开关电源,但仍比 TOPSwitch 系列性能更优	PI 公司 (2000 年)
L4960	L4960,L4962,L296,L4964	属于多端低压直流电源变换器,内含 PWM 调制器、功率开关管及软启动、过流保护、过热保护电路。L4970A 系列还增加了欠压保护电路。输出电压通常为 5.1~40V,且连续可调,输出电流为 1.5~10A,开关频率为 100kHz 或 200kHz。能构成 400W 以下大、中功率的开关电源,电源效率最高可达 90%以上。配交流电时需首先经工频变压器进行隔离和降压,再整流、滤波,作为其输入电压	SGS-Thomson 公司 (20 世纪 80 年代中期~90 年代)
L4970	L4970,L4972,L4974,L4975,L4977		
L4970A	L4970A,L4972A L4972AD,L4974A L4975A,L4977A		

1.4 单片开关电源的基本原理及反馈电路类型

下面介绍单片开关电源的基本工作原理、两种工作模式及反馈电路的四种基本类型。

1.4.1 单片开关电源的基本原理

TOPSwitch 系列单片开关电源的典型应用电路如图 1.4.1 所示。高频变压器在电路中具备能量存储、隔离输出和电压变换这三大功能。由图可见,高频变压器初级绕组 N_P 的极性(同名端用黑圆点表示),恰好与次级绕组 N_S 、反馈绕组 N_F 的极性相反。这表明在 TOPSwitch 导通时,电能就以磁场能量形式储存在初级绕组中,此时 VD_2 截止。当 TOPSwitch 截止时, VD_2 导通,能量传输给次级,此即反激式开关电源的特点。图中,BR 为整流桥, C_{IN} 为输入端滤波电容。交流电压 u 经过整流滤波后得到直流高压 V_1 ,经初级绕组加至 TOPSwitch 的漏极上。鉴于在 TOPSwitch 关断时刻,由高频变压器漏感产生的尖峰电压,会叠加在直流高压 V_1 和感应电压 V_{OR} 上,可使功率开关管的漏极电压超过 700V 而损坏芯片;为此在初级绕组两端必须增加漏极钳位保护电路。钳位电路由瞬态电压抑制器或稳压管(VD_{Z1})、阻塞二极管(VD_1)组成, VD_1 宜采用超快恢复二极管(SRD)。 VD_2 为次级整流管, C_{OUT} 是输出端滤波电容。

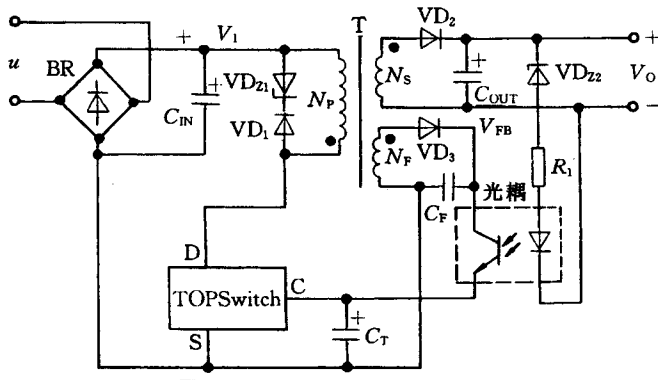


图 1.4.1 单片开关电源典型应用电路

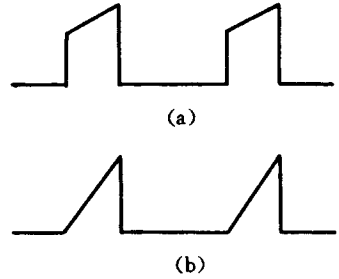
该电源采用配稳压管的光耦反馈电路。反馈绕组电压经过 VD_3 、 C_F 整流滤波后获得反馈电压 V_{FB} ,经光耦合器中的光敏三极管给 TOPSwitch 的控制端提供偏压。 C_T 是控制端 C 的旁路电容。设稳压管 VD_{Z2} 的稳定电压为 V_{Z2} ,限流电阻 R_1 两端的压降为 V_R ,光耦合器中 LED 发光二极管的正向压降为 V_F ,输出电压 V_O 由下式设定:

$$V_O = V_{Z2} + V_F + V_R \quad (1.4)$$

该电源的稳压原理简述如下:当由于某种原因(如交流电压升高或负载变轻)致使 V_O 升高时,因 V_{Z2} 不变,故 V_F 就随之升高,使 LED 的工作电流 I_F 增大,再通过光耦合器使 TOPSwitch 的控制端电流 I_C 增大。但因 TOPSwitch 的输出占空比 D 与 I_C 成反比,故 D 减小,这就迫使 V_O 降低,达到稳压目的。反之, $V_O \downarrow \rightarrow V_F \downarrow \rightarrow I_F \downarrow \rightarrow I_C \downarrow \rightarrow D \uparrow \rightarrow V_O \uparrow$,同样起到稳压作用。由此可见,反馈电路正是通过调节 TOPSwitch 的占空比,使输出电压趋于稳定的。

1.4.2 单片开关电源的两种工作模式

单片开关电源有两种工作模式^①，一种是连续模式 CUM(Continuous Mode)，另一种是不连续模式 DUM(Discontinuous Mode)。这两种模式的开关电流波形分别如图 1.4.2(a)、(b)所示。由图可见，在连续模式下，初级开关电流是从一定幅度开始的，然后上升到峰值，再迅速回零。其开关电流波形呈梯形。这表明，因为在连续模式下，储存在高频变压器的能量在每个开关周期内并未全部释放掉，所以下一开关周期具有一个初始能量。采用连续模式可减小初级峰值电流 I_P 和有效值电流 I_{RMS} ，降低芯片的功耗。但连续模式要求增大初级电感量 L_P ，这会导致高频变压器的体积增大。综上所述，连续模式适用于选输出功率较小的 TOPSwitch 和尺寸较大的高频变压器。



(a) 连续模式；(b) 不连续模式

图 1.4.2 两种模式的开关电流波形

不连续模式的开关电流则是从零开始上升到峰值，再降至零的。这意味着储存在高频变压器中的能量必须在每个开关周期内完全释放掉，其开关电流波形呈三角形。不连续模式下的 I_P 、 I_{RMS} 值较大，但所需要的 L_P 较小。因此，它适合采用输出功率较大的 TOPSwitch，配尺寸较小的高频变压器。

三端单片开关电源大多设计在连续模式。有关工作模式的设定，详见 8.2 节。

1.4.3 反馈电路的四种基本类型

单片开关电源的电路可以千变万化，但其反馈电路只有 4 种基本类型：① 基本反馈电路；② 改进型基本反馈电路；③ 配稳压管的光耦反馈电路；④ 配 TL431 的精密光耦反馈电路。它们的简化电路分别如图 1.4.3(a)~(d)所示。

图(a)为基本反馈电路，其优点是电路简单、成本低廉，适于制作小型化、经济性开关电源；其缺点是稳压性能较差，电压调整率 $S_V = \pm 1.5\% \sim \pm 2\%$ ，负载调整率 $S_I \approx \pm 5\%$ 。

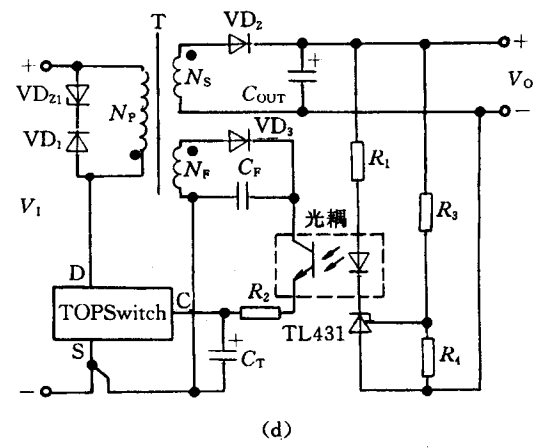
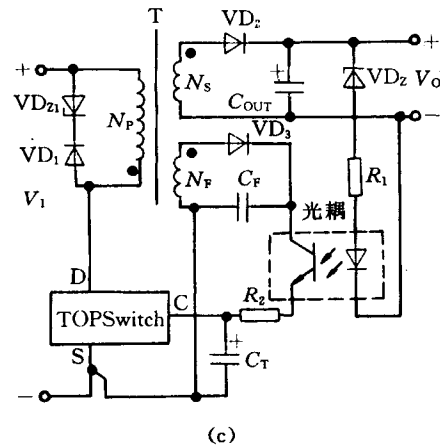
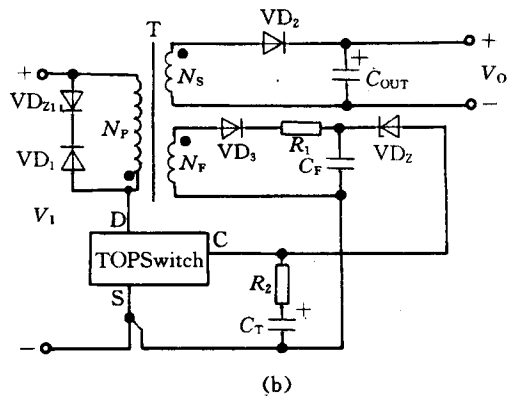
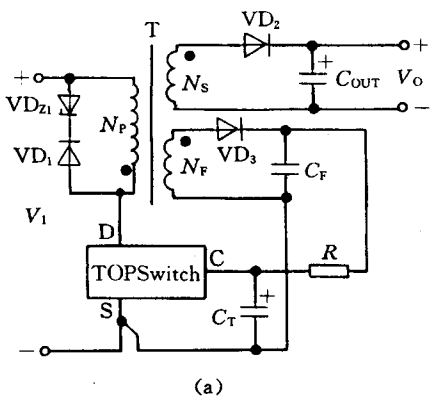
图(b)为改进型基本反馈电路，只需增加一只稳压管 VD_Z 和电阻 R_1 ，即可使负载调整率达到 $\pm 2\%$ 。 VD_Z 的稳定电压一般为 22V，需相应增加反馈绕组的匝数，以获得较高的反馈电压 V_{FB} ，满足电路的需要。

图(c)是配稳压管的光耦反馈电路。由 VD_Z 提供参考电压 V_Z ，当 V_O 发生波动时，在 LED 上可获得误差电压。因此，该电路相当于给 TOPSwitch 增加一个外部误差放大器，再与内部误差放大器配合使用，即可对 V_O 进行调整。这种反馈电路能使负载调整率达到 $\pm 1\%$ 以下。

图(d)是配 TL431 的精密光耦反馈电路，其电路较复杂，但稳压性能最佳。这里用 TL431 型可调式精密并联稳压器来代替稳压管，构成外部误差放大器，进而对 V_O 作精细调整，可使电压调整率和负载调整率均达到 $\pm 0.2\%$ ，能与线性稳压电源相媲美。这种反馈电路适于构成精密开关电源。

在设计单片开关电源时，应根据实际情况来选择合适的反馈电路，才能达到规定的技术指标和经济指标。

^① 仅对 TinySwitch 四端单片开关电源而言，还有一种完全不连续模式 FDM(Fully Discontinuous Mode)。



(a)

(b)

(c)

(d)

(a) 基本反馈电路;(b) 改进型基本反馈电路;

(c) 配稳压管的光耦反馈电路;(d) 配 TL431 的精密光耦反馈电路

图 1.4.3 反馈电路的 4 种基本类型

1.5 单片开关电源典型产品的技术指标

不同系列单片开关电源的内部电路或引出端数量不尽相同,它们的技术指标也存在差异。表 1.5 列出了 5 种典型产品的主要技术指标,它们分别对应于 TOPSwitch—Ⅰ 系列 (TOP227Y)、TinySwitch 系列 (TNY255P/G)、TNY256 系列 (TNY256P/G/Y)、MC33370 系列 (MC33374T/TV)、TOPSwitch—FX 系列 (TOP234P/G/Y)。总共有 11 种型号。表中的参数值一般为典型值。

表 1.5 单片开关电源典型产品的技术指标

参数名称	符号及单位	产品型号				
		TOP227Y	TNY255P/G	TNY256P/G/Y	MC33374T/TV	TOP234P/G/Y
开关频率	f (kHz)	100	130	130	100	130/65
最大占空比	D_{max} (%)	67	67	66	74	78
最小占空比	D_{min} (%)	1.7			0.9	1.5
脉宽调制增益	K (%/mA)	-16			-14	-22

续表

参数名称	符号及 单位	产品型号				
		TOP227Y	TNY255/P/G	TNY256P/G/Y	MC33374T/TV	TOP234P/G/Y
控制端电压	$V_C(V)$	5.7			8.5	5.8
使能端电压	$V_{EN}(V)$		1.45	1.45		
旁路端电压	$V_{BP}(V)$		5.8	5.8		
状态控制端开启电压	$V_{SCI(ON)}(V)$				3.55	
自动重新启动频率	$f_{AR}(Hz)$	1.2			1.2	1.0
自动重新启动占空比	$D_{AR}(\%)$	5			5	4
漏极极限电流	$I_{LIMIT}(A)$	3.00	0.280	0.500	3.3	1.500
漏-源击穿电压最小值	$V_{(BR)DS}(V)$	700	700	700	700	700
最大输出功率(固定输入)	$P_{OM}(W)$	150	10	19	150	75
前沿闭锁时间	$t_{LEB}(ns)$	180	215	215	280	200
热关断温度	$T_{OFF}(C)$	135	135	135	157	135
上电复位阈值电压	$V_{C(RESET)}(V)$	3.3				3.3
漏-源导通电阻($T_j=25C$)	$R_{DS(ON)}(\Omega)$	2.6	23	15.6	3.0	5.2
软启动时间	$t_{SOFT}(ms)$					10
线路欠压阈值电流	$I_{UV}(\mu A)$					50
线路过压阈值电流	$I_{OV}(\mu A)$					225
多功能端电压($I_M=50\mu A$)	$V_M(V)$					2.60
开关频率选择端阈值电压	$V_F(V)$					2.9
开关频率选择端输入电流	$I_F(\mu A)$					22
遥控开/关阈值电流	$I_{REM}(\mu A)$					-35
遥控开启延迟时间	$t_{R(ON)}(\mu s)$					2.5
遥控关断延迟时间	$t_{R(OFF)}(\mu s)$					2.5
极限电流衰减因数	K_I					0.4~1.0
频率抖动调制速率	$f_M(\text{次}/s)$					250
频率抖动偏移量	$\Delta f(kHz)$			± 5		$\pm 4/\pm 2^*$

* 当 $f=130kHz$ 时, $\Delta f=\pm 4kHz$; $f=65kHz$ 时, $\Delta f=\pm 2kHz$ 。