

晶体管开关稳压电源

华东计算技术研究所电 源 研 究 室 编著
中国科学院计算技术研究所电源室 审校

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 简 介

本书全面介绍晶体管开关稳压电源,重点是串联式开关稳压电源、直流变换器和无工频变压器开关稳压电源的基本原理、电路分析和设计计算,还列举了一些实用电路及设计实例。

本书可供从事研究、制造和使用维修直流稳压电源的科研人员、工程技术人员阅读。也可供高等院校及中等专业学校有关专业的师生参考。

晶体管开关稳压电源

华东计算技术研究所电源研究室 编著
中国科学院计算技术研究所电源室 审校

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1985年5月第一版

印张: 10 页数: 160 1985年5月天津第一

字数: 264千字 印数: 1—17,0

统一书号: 15045·总 2959—

定价: 2.20元

前 言

稳定电源是稳压电源、稳流电源和具有某种稳定性能电源的总称。几乎所有涉及电子技术的领域都离不开稳定电源。

日常生活和工农业生产中经常要遇到一些稳定电源：在飞机、舰船、机车等交通运输工具上和远离电网的高山、水下科学考查站运行着大量的逆变器和变频器电源；卫星、导弹、飞船等空间运载装置上，稳定电源在体积、重量、可靠性和对温度、辐射等恶劣条件的适应性诸方面有极严格的要求；高能物理研究中，强大电流的稳定电源是必不可少的；核工程、激光技术等会遇到许多高压电源、稳频电源；计量测试、精密仪表，以及许多先进技术中更多地需要高稳定度和高精度的电源装置；在日新月异的计算机工程、电信工程中，普遍采用各种开关电源和不停电供电系统……。

上述那些稳定电源的技术资料，大部分都分散在专业杂志、会议文集和内部资料里，供人们全面了解稳定电源技术的书籍还不多，现有的一些稳定电源技术书籍，多数是介绍基本原理和实用知识，在深度和广度方面大都还不能满足当前研究设计工作的实际需要。鉴于这种情况，中国电源学会编辑工作委员会准备向广大读者推荐一些比较深入地论述不同类型稳定电源的著作，以适应不同需要的读者选用。

《晶体管开关稳压电源》一书由华东计算技术研究所第五研究室编著。本书对体积小、重量轻、高效率的各种开关稳压电源作了全面介绍；重点论述了串联式开关稳压电源、直流变换器和无工频变压器开关稳压电源的工作原理和设计计算；给出许多具有实用价值的实际电路。此外，书中对国外开关稳压电源的新技术、新成果也作了一定的介绍。本书不仅对从事直流稳压电源研究和生产的科

技人员有益，而且对电子电路工作者和革新者都有参考价值。

参加该书写作的有马传添、庄蓄田、杨承丰、尹凤鸣、乔可君、刘仲方、滕富民等同志。

本书承中国科学院计算技术研究所电源室李道恺、刘春贵、游延丰、方资端、严家跃等同志审阅，提出许多宝贵意见，并由刘春贵同志作了调整和补充，在此一并致谢。

中国电源学会编辑工作委员会

1983年12月

目 录

绪论	1
第一章 串联式开关稳压电源	5
1-1 串联式开关稳压电源	6
1-1-1 工作原理和电路分析	6
1-1-2 电感和滤波电容计算, 工作频率的选择	11
1-1-3 开关功率晶体管和续流二极管功耗计算	17
1-1-4 输出电压过冲和电压维持时间计算	24
1-1-5 保护回路	29
1-1-6 驱动回路	34
1-2 升压式开关稳压电源	39
1-2-1 工作原理和电路分析	39
1-2-2 临界电感计算	43
1-2-3 纹波电压和滤波电容计算	45
1-2-4 开关功率晶体管和续流二极管应用参数的计算	46
1-3 极性反转式开关稳压电源	47
1-3-1 工作原理和电路分析	47
1-3-2 临界电感计算	52
1-3-3 纹波电压和滤波电容计算	53
1-3-4 开关功率晶体管和续流二极管应用参数的计算	54
1-4 开关稳压电源的实用电路	55
1-4-1 控制电路为集成电路的串联式开关稳压电源	55
1-4-2 输出连续可调的 2 ~ 30V、3 A 串联式开关稳压电源	61
1-4-3 多谐振荡器控制的 5 V、40A 串联式开关稳压电源	64
1-4-4 30V、2 A 升压式开关稳压电源	70
第二章 直流变换器式开关稳压电源	72
2-1 单管式直流变换器	73

2-1-1	单管自激式变换器的工作原理和计算公式	73
2-1-2	单管自激式变换器的电路形式和电路实例	78
2-1-3	单管他激式变换器的工作原理和电路形式	82
2-2	推挽式直流变换器	89
2-2-1	推挽自激式单变压器直流变换器	89
2-2-2	推挽自激式双变压器直流变换器	102
2-2-3	推挽他激式直流变换器	110
2-3	桥式直流变换器	115
2-3-1	桥式自激直流变换器	115
2-3-2	桥式他激直流变换器	118
2-4	直流变换器式开关稳压电源	120
2-4-1	调节占空比的变换器稳压电路	120
2-4-2	前置串联式开关稳压器的变换器稳压电路	123
2-4-3	后置串联线性稳压器的变换器稳压电路	123
2-4-4	后置磁放大器稳压的变换器稳压电路	124
2-4-5	直流变换器的效率	127

第三章 无工频变压器开关稳压电源的原理

3-1	无工频变压器开关稳压电源的类型和特点	132
3-2	无工频变压器开关稳压电源的主电路	137
3-2-1	单管式无工频变压器开关电源的主电路	137
3-2-2	推挽式、桥式无工频变压器开关电源的主电路	143
3-3	无工频变压器开关稳压电源的控制电路	146
3-3-1	脉宽控制电路	146
3-3-2	驱动电路	174
3-3-3	防止“共态导通”	189
3-3-4	保护电路	194
3-3-5	输入电压软启动和输出电压的缓升电路	202

第四章 无工频变压器开关稳压电源的设计

4-1	无工频变压器开关稳压电源的电路设计	206
4-1-1	变换器频率和主电路形式的选择	206
4-1-2	输入滤波电容器计算	207

4-1-3	脉宽调制器工作点的选择	210
4-1-4	高频功率变压器的设计	213
4-1-5	输出滤波器的设计	225
4-1-6	大电流开关二极管	244
4-1-7	开关功率晶体管	252
4-2	无工频变压器开关稳压电源的实用电路	264
4-2-1	25W多路输出的自激式单管变换器稳压电源	264
4-2-2	5V、10A他激式单管变换器稳压电源	267
4-2-3	5V、20A正激式单管变换器稳压电源	270
4-2-4	25V、10A双反激式单管变换器稳压电源	272
4-2-5	5V、100A半桥式变换器稳压电源	274
4-2-6	5V、50A推挽式变换器稳压电源	277
4-2-7	-5V、250A全桥式变换器稳压电源	279
第五章	开关电源噪声的抑制	285
5-1	噪声的产生	285
5-2	开关功率晶体管和开关二极管噪声的抑制	287
5-3	高频变压器噪声的抑制	294
5-4	电容器、电感器、导线对噪声的影响	298
5-5	电网滤波器和浪涌吸收器	306
5-6	开关电源的接地	307
5-7	开关电源的使用方法	309
	主要参考资料	311

绪 论

直流稳压电源是许多电子设备所不可缺少的重要组成部分。它就像人们的心脏不断地为人体提供血液那样，向电子设备输送符合一定技术指标的直流电源。现在已经有各种各样的直流稳压电源，但是在这种种不同类型的直流稳压电源当中，目前国内大量应用的是晶体管串联式线性直流稳压电源和晶体管开关式直流稳压电源（本书简称为晶体管开关稳压电源）。

图0-1为晶体管串联式线性稳压电源的原理框图。交流市电先由电源变压器变压，整流滤波后得到未稳定的直流电压，再经过调整后便得到所需要的直流稳压电源。调整的过程是：对输出电压的变化进行采样，与基准电压进行比较，经过放大去改变串联调整管两端的电压，实现稳定输出电压的目的。晶体管串联式线性稳压电源电路技术比较成熟，可以达到很高的电压稳定度（对电网变化的稳定度）和负载稳定度（对负载变化的稳定度），纹波电压也很小，没有开关稳压电源带来的那种干扰和噪音。另外，还具有响应迅速，使用可靠，维修简单等优点。因而这种电源不但目前使用相当普

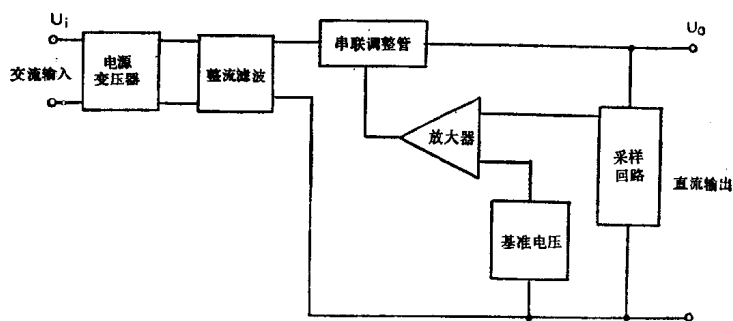


图 0-1 晶体管串联式线性稳压电源的原理框图

遍，而且还将继续发展和应用。现在这种电源的发展趋势是：集成线性稳压电源正在大量发展与应用，高精度方面的应用，采用各种形式的过流过压保护，研究降低调整管电压降等，以提高电源的效率，使工作更加可靠，性能更为优良。

晶体管串联式线性稳压电源也有其固有的缺陷。例如通常都需要有工频电源变压器，作为变压和隔离之用，这种电源变压器体积大而笨重。所需的滤波器体积和重量也相当大。又如，调整管工作在线性状态，为了保证输出电压有足够的稳定范围，调整管上必须留有一定余量的电压降，这样调整管的功耗增大，而且必须相应地安装体积大的散热器。总之，这种电源效率低、体积大、笨重。尤其不适宜于制作功率大的稳压电源。随着半导体技术的不断发展，集成电路在电子设备中大量使用，电子设备的安装密度愈来愈高，因而在许多场合使用晶体管串联式线性稳压电源就越来越不适应，显得笨重、庞大。于是电源小型化这个课题就很突出，从而促进了效率高、重量轻、体积小的开关稳压电源迅速发展。

首先得到发展的是晶体管串联式开关稳压电源。图0-2为晶体管串联式开关稳压电源的原理框图。串联式开关稳压电源电路是由串联式线性稳压电源电路演变而来。这两种电路的结构形式相似，但是它们的稳压调节原理是不同的。在串联式开关稳压电源里，其调节原理是将输出电压的变化采样，经过比较放大，使其变成脉冲宽度的变化，从而控制功率晶体管的导通时间，达到稳定输出电压的目的。图0-2中的开关功率晶体管 BG 不像串联式线性稳压电源中的调整管那样处于线性导通状态，而是处于开关工作状态，即饱和导通与截止两种状态。因此，大大减少了在功率晶体管上的功率损耗，提高了稳压电源的效率。

随着电子工业和电子科学技术的发展，高反压大功率开关晶体管等重要元器件的出现，这就为取消串联式开关稳压电源中的电源变压器、发展 $20KHz$ 以上无工频变压器的开关电源创造了条件。这种无工频变压器的开关电源是一种新型电源，在电源的小型化、轻

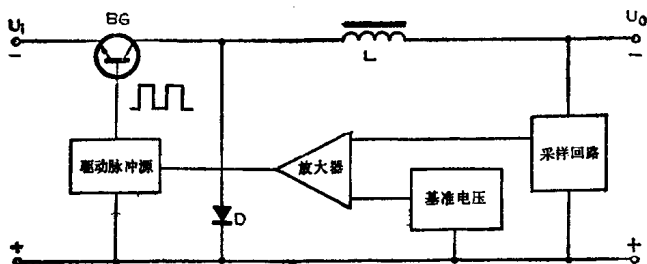


图 0-2 晶体管串联式开关稳压电源的原理框图

量化、高效率等方面比串联型开关稳压电源更为优越。可广泛用于宇航、电子计算机、电视广播、通信、电子仪器及其它电子设备等方面，能较好地满足现代电子科学技术和电子工业的发展要求。这种新型电源可以节约大量的能源—电力，还可以节约大量重要物资—硅钢片和铜材。下面就晶体管串联式线性稳压电源、串联式开关稳压电源，无工频变压器开关稳压电源三者的几项主要电性能和物理性能指标，列表作一粗略的比较、说明。

从上表的比较中可以看出，无工频变压器开关稳压电源具有明显的特点是：

- (1) 效率高：一般在 $60 \sim 85\%$ ，而且输入电压和输出电压变化时其效率的变化也较小。
- (2) 体积小：单位体积的输出功率为 $50 \sim 60 W/l$ 。
- (3) 重量轻：单位重量的输出功率为 $40 \sim 60 W/kg$ 。
- (4) 低噪声： $20 KHz$ 以上时超声工作。
- (5) 电压维持时间长：可达 $20ms$ 左右，便于实现信息保护。
- (6) 输出纹波较大： $10 \sim 100 mV$ （峰—峰值）。
- (7) 控制电路比较复杂：使用元件多，调试和维修比较麻烦。
- (8) 暂态时间（过渡过程）稍长。

另外，无工频变压器开关稳压电源过压的可能性比较小，特别是开关晶体管击穿时不会像串联式线性稳压电源和串联式开关稳压电源那样，输出电压大幅度升高危及负载。

无工频变压器开关稳压电源已经在一些工业发达国家得到了迅速发展。一些厂家、公司竞相生产这种电源，而且品种繁多，系列产品也纷纷涌现。同时还发展了无工频变压器开关稳压电源专用的元器件。例如，磁芯就有E型系列的，罐型系列的产品。电容器除高频电容以外还有聚丙烯电容（一种无感电容）。整流元件有快恢复的二极管，有工作频率高、反向恢复时间短、正压降低的肖特基二极管。控制电路也有好几种专用的大规模集成电路。

开关稳压电源这一新技术正在迅速发展，完全无电源变压器的开关稳压电源已经出现。随着开关稳压电源理论的进一步完善和开关稳压电源元器件的改进，提高开关稳压电源的电性能和物理性能，特别是对射频干扰的进一步抑制，减小纹波电压，开关稳压电源将会得到更大的发展，使用将更加广泛。

三种稳压电源性能比较表

电源类型 比较项目	线性稳压电源	串联式开关稳压电源	无工频变压器 开关稳压电源
电压稳定度（电网变化 $\pm 10\%$ ）	0.01~0.05%	0.1~0.2%	0.1~0.2%
负载稳定度（负载变化 0~100%）	0.02~0.05%	0.1~0.2%	0.1~0.2%
输出纹波（峰—峰值）	<5mV	10~100mV	10~100mV
上升建立时间	100 μ s	100ms	100ms
电压维持时间	5ms	25ms	25ms
过渡过程	0.02~0.1ms	0.5~数ms	0.5~数ms
效率	30~40%	40~70%	60~85%
体积	1	2/3~1/3	1/3~1/5
重量	1	2/3	1/3
可靠性（MTBF）	100000小时	50000~100000小时	30000~100000小时
控制电路元件个数	10~30个	10~50个	30~120个

第一章 串联式开关稳压电源

串联式开关稳压电源，通常其输入为直流电压，晶体管工作于开关状态，工作波形为矩形波，经过脉冲占空比的调制，再经滤波，在输出端得到一个稳定的直流电压，此输出电压与输入电压对电场而言是不隔离的。该电路在日本通常被称为斩波电路（chopper circuit, チョツパ回路）。

串联式开关稳压电源是最基本的开关稳压电源，使用较早，应用较广，是本章介绍的主要内容。此外，本章还介绍了升压式开关稳压电源和极性反转式开关稳压电源。

图1-1为开关稳压电源的作用原理图。图中 U_i 为直流输入电压， K 为理想的晶体管开关， U_o 是一串矩形波电压，其平均值 U_{oa} 为：

$$U_{oa} = \frac{1}{T} \int_0^{T_{on}} U_i dt = \frac{U_i T_{on}}{T} = \frac{U_i (T - T_{off})}{T} = U_i \delta \quad (1-1)$$

式中： T ——开关的工作周期

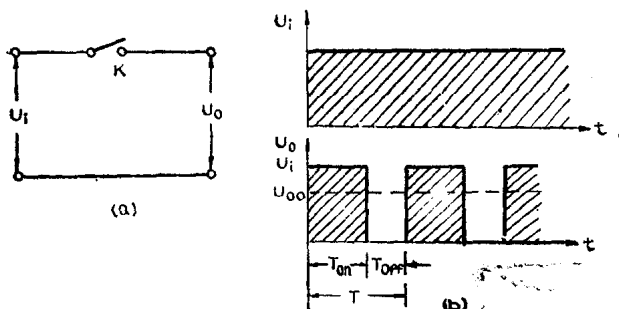


图 1-1 开关稳压电源的作用原理图

T_{on} ——开关的导通时间

T_{off} ——开关的截止时间

$$\delta = \frac{T_{on}}{T} \text{——开关的脉冲占空比}$$

由此可见，只要在电路中接入一个脉冲调制回路，适当调制开关的脉冲占空比 δ 就可以维持输出电压恒定不变。 δ 的调制有下面三种方式：

(1) 在 T 值不变的情况下，改变 T_{on} ，称为脉冲宽度调制。

(2) 在 T_{on} 值不变的情况下，改变 T ；或在 T_{off} 不变的情况下，改变 T ，称为脉冲频率调制。

(3) 既改变 T_{on} ，也改变 T ；或既改变 T_{off} ，也改变 T ，称为脉冲宽度频率混合调制。

通常采用第一和第三两种调制方式，在第一种调制中因为频率不变，故无论对电路中的磁性元件及晶体管的测试和设计都较方便，且对射频干扰的抑制也较容易。第三种调制则因线路较简单（自激式的属于这一类）也得到广泛的应用。相对而言，第二种调制则较少采用。

按照开关、电感、负载在电路中的相对位置，开关稳压电源可分成三类：

- (1) 串联式开关稳压电源；
- (2) 升压型开关稳压电源；
- (3) 极性反转型开关稳压电源。

1-1 串联式开关稳压电源

1-1-1 工作原理和电路分析

串联式开关稳压电源又称为降压式开关稳压电源。由于它电路较为简单，性能较好，设计、调试、维修均较方便，故应用比较广

泛。国外在60年代中期已得到广泛的应用，国内则在60年代中期开始研制，70年代初才开始较广泛的应用。

图1-2是串联式开关稳压电源的原理方框图，假设由于输入直流电压或负载电流发生改变而使输出直流电压产生变化时，采样电路就将此变化电压信号送入比较放大器与基准电压进行比较产生一个误差信号，然后进行放大，放大后的误差信号送至脉冲调制回路改变其脉冲占空比，再将此脉冲送至晶体管开关，改变其脉冲输出电压的平均值，从而使电源的直流输出电压维持不变。

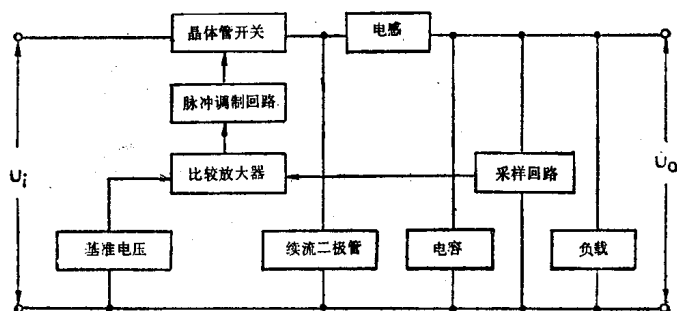


图 1-2 串联式开关稳压电源原理方框图

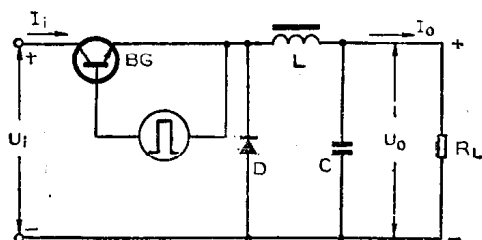


图 1-3 串联式开关稳压电源的基本电路

图1-3为串联式开关稳压电源的基本电路，

图中： U_i ——输入直流电压

I_i ——输入直流电流

U_o ——输出直流电压

I_o ——负载电流

R_L ——负载电阻

BG ——开关晶体管

D ——续流二极管

L ——电感

C ——电容

为了讨论及计算的方便，作如下的假设：

(1) BG 、 D 、 L 、 C 均为理想元件。

(2) 在周期的每一部份，电感上的电压分别保持常数，电感量 L 也维持不变，并且足够大。

(3) U_i 是稳定的直流电压

根据上述的假设，对其稳态过程作如下的分析：

(1) $0 \sim t_1$ ：即 BG 导通时间

此时图1-3的等效电路如图1-4所示。开关晶体管 BG 导通时，电感 L 两端电压为 $(U_i - U_o)$ ，参阅图1-6(a)，此时续流二极管 D 处于反偏截止状态，电感中的电流 i_{Lon} 呈线性上升，其方程式为：

$$L \frac{di_{Lon}}{dt} = U_i - U_o$$

$$di_{Lon} = \frac{1}{L} (U_i - U_o) dt$$

$$\int_0^t di_{Lon} = \int_0^t \frac{1}{L} (U_i - U_o) dt \quad (\text{其中 } 0 \leq t \leq t_1)$$

$$i_{Lon} = \int_0^t \frac{1}{L} (U_i - U_o) dt + I_{Lo}$$

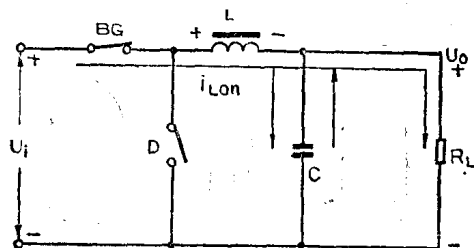


图 1-4 开关晶体管 BG 导通期间的等效电路

$$\therefore i_{L_{on}} = \frac{U_i - U_o}{L}t + I_{L0} \quad (1-2)$$

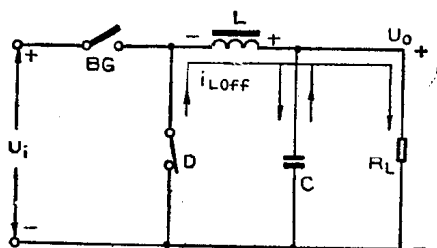


图 1-5 开关晶体管BG截止期间的等效电路

式中 I_{L0} 为电感在 $t = 0$ 时的起始电流。当 $t = t_1$ 时，电感中的电流达到最大值 I_{Lmax} ，参阅图1-6(b)，其上的磁场能量也达到最大值即 $\frac{1}{2}I_{Lmax}^2 L$ ，其中

$$I_{Lmax} = \frac{U_i - U_o}{L} T_{on} + I_{L0} \quad (1-3)$$

(2) $t_1 - t_2$: 即BG截止时间

此时图1-3的等效电路如图1-5所示。至 t_1 时，开关晶体管 BG 截止，此时电感 L 上的电压极性发生颠倒，续流二极管 D 导通，先前贮藏在 L 中的能量开始释放，由于电感中的电流不能突变，它必须在 I_{Lmax} 的基础上线性地减小，此电流继续向负载提供电流，故负载上的电流始终是连续的。电感上的感应电压则被续流二极管 D 钳位于输出电压 $-U_o$ ，即

$$-U_o = L \frac{di_{Loff}}{dt}$$

$$di_{Loff} = -\frac{U_o}{L} dt$$

$$\int_{t_1}^t di_{Loff} = \int_{t_1}^t -\frac{U_o}{L} dt \quad (\text{其中 } t_1 \leq t \leq t_2)$$

所以，此期间电感中的电流方程式为

$$i_{Loff} = I_{Lmax} - \frac{U_o}{L}(t - t_1) \quad (1-4)$$

当 $t = t_2$ 时, i_{Loff} 达到最小值 I_{Lmin}

$$I_{Lmin} = I_{Lmax} - \frac{U_o}{L}T_{off} \quad (1-5)$$

因为是稳态, 故 $I_{Lmin} = I_{Lo}$, 将 (1-5) 式代入 (1-3) 式得

$$I_{Lmax} = \frac{U_i - U_o}{L}T_{on} + I_{Lmin} - \frac{U_o}{L}T_{off}$$

$$\therefore \frac{T - T_{on}}{T_{on}} = \frac{U_i - U_o}{U_o}$$

$$\text{令 } \frac{T_{on}}{T} = \delta (\text{占空比})$$

$$\text{则 } \frac{1}{\delta} - 1 = \frac{U_i}{U_o} - 1$$

$$\therefore \delta = \frac{U_o}{U_i} \quad \text{即 } U_o = U_i \delta \quad (1-6)$$

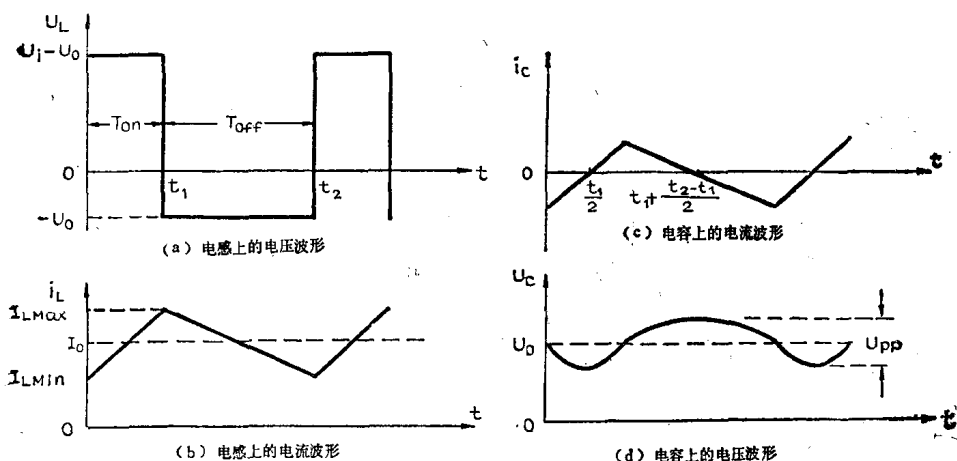


图 1-6 串联式开关稳压电源的重要波形图

串联式开关稳压电源的主要波形如图1-6所示。这里要指出, BG刚导通时, L 上电流处于最小值 I_{Lmin} , 此后虽然 L 上电流开始