



第7章 逆变式弧焊电源简介

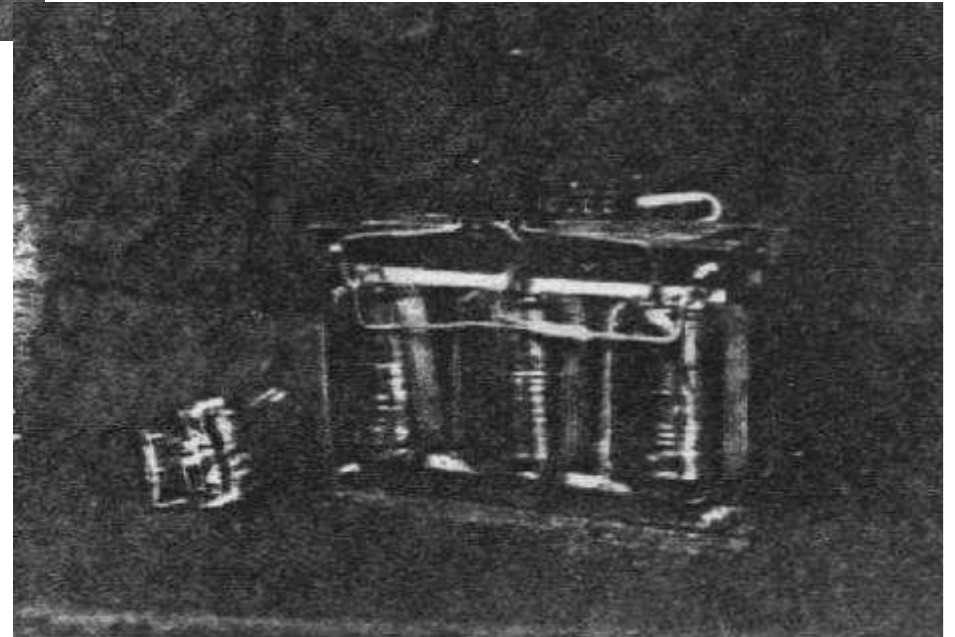
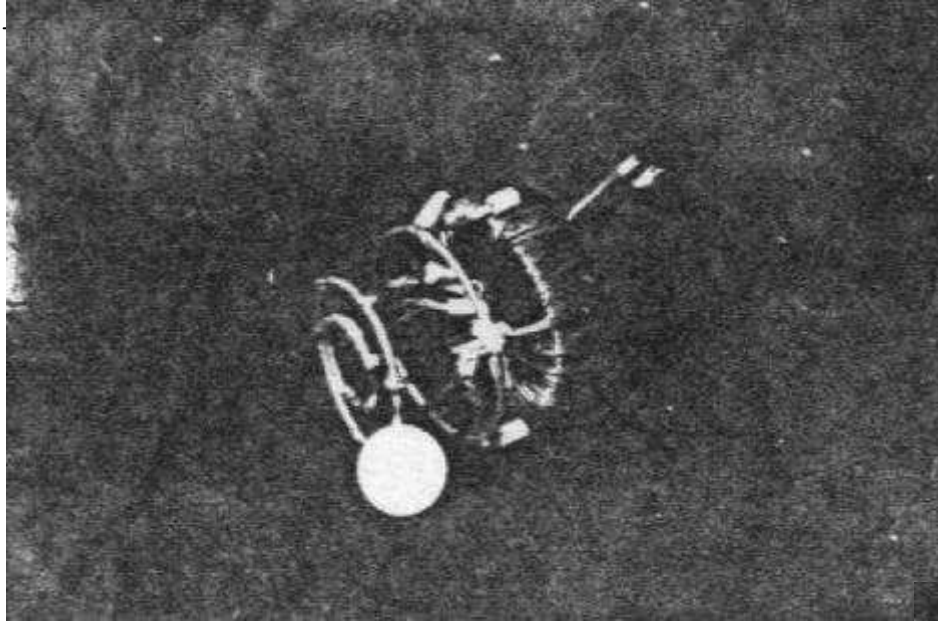
随着现代电力电子技术的发展，各种大功率的电子开关器件的出现，为电子化和数字化弧焊电源的发展奠定了基础。逆变式弧焊电源是一种新型的，而且已经得到广泛应用的电子控制型弧焊电源。

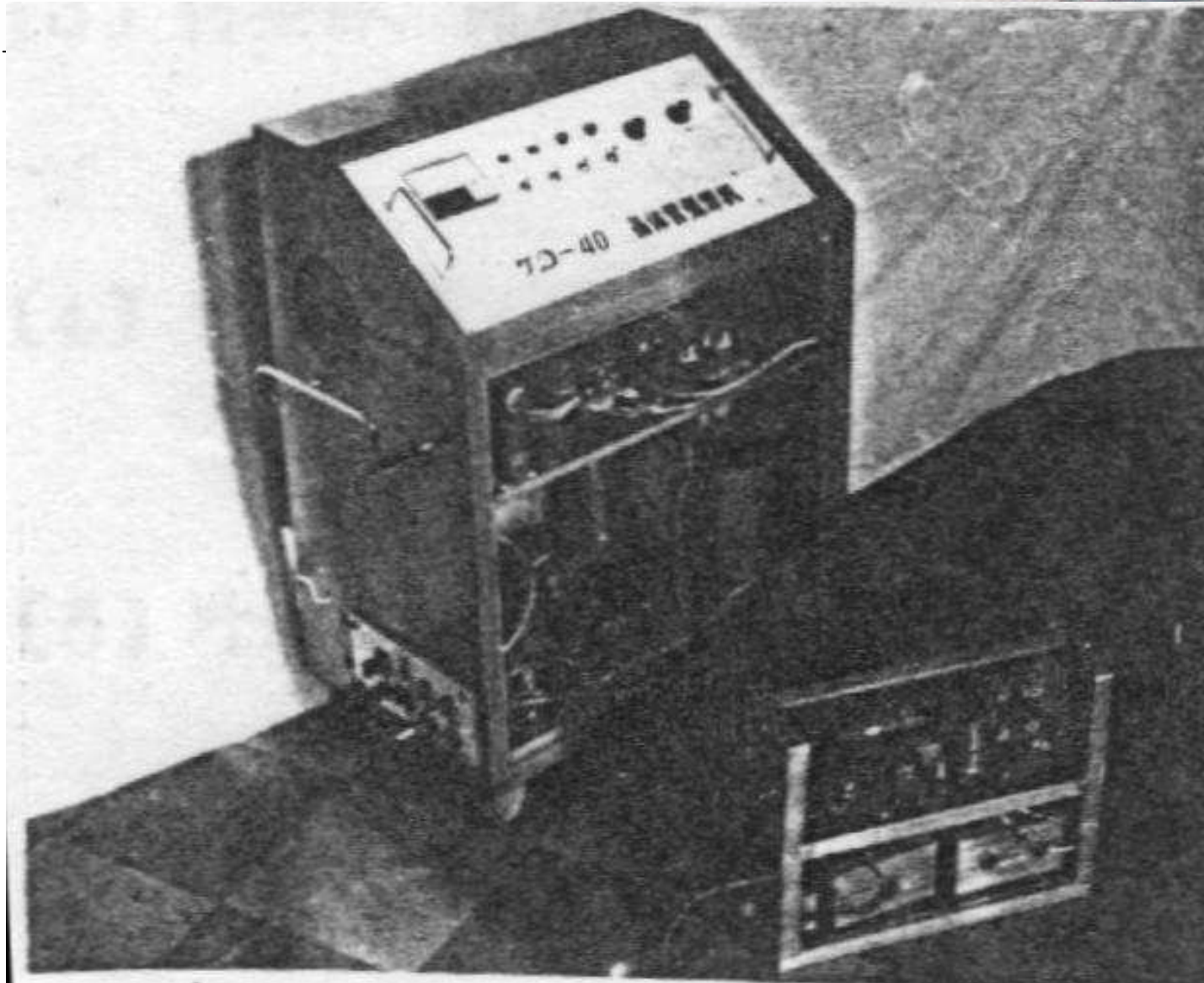
AC→DC 正变

DC→AC 逆变

逆变弧焊电源是将电流逆变技术应用于弧焊电源中。所谓逆变是相对于常见的交流电经过整流变为直流电而言的，即将直流电变为交流电的变换称为逆变。实现电流逆变的装置称为逆变器，用于弧焊电源的逆变器即为弧焊逆变器。

逆变式弧焊电源出现在二十世纪六、七十年代，其优良的性能和显著的特点得到人们的重视，被视为新一代弧焊电源，甚至被称为“20kHz革命”，尤其是在最近十几年，逆变焊接电源得到了快速发展。





School of Materials Science & Engineering, Tianjin University



7.1.1 逆变弧焊电源系统的基本结构

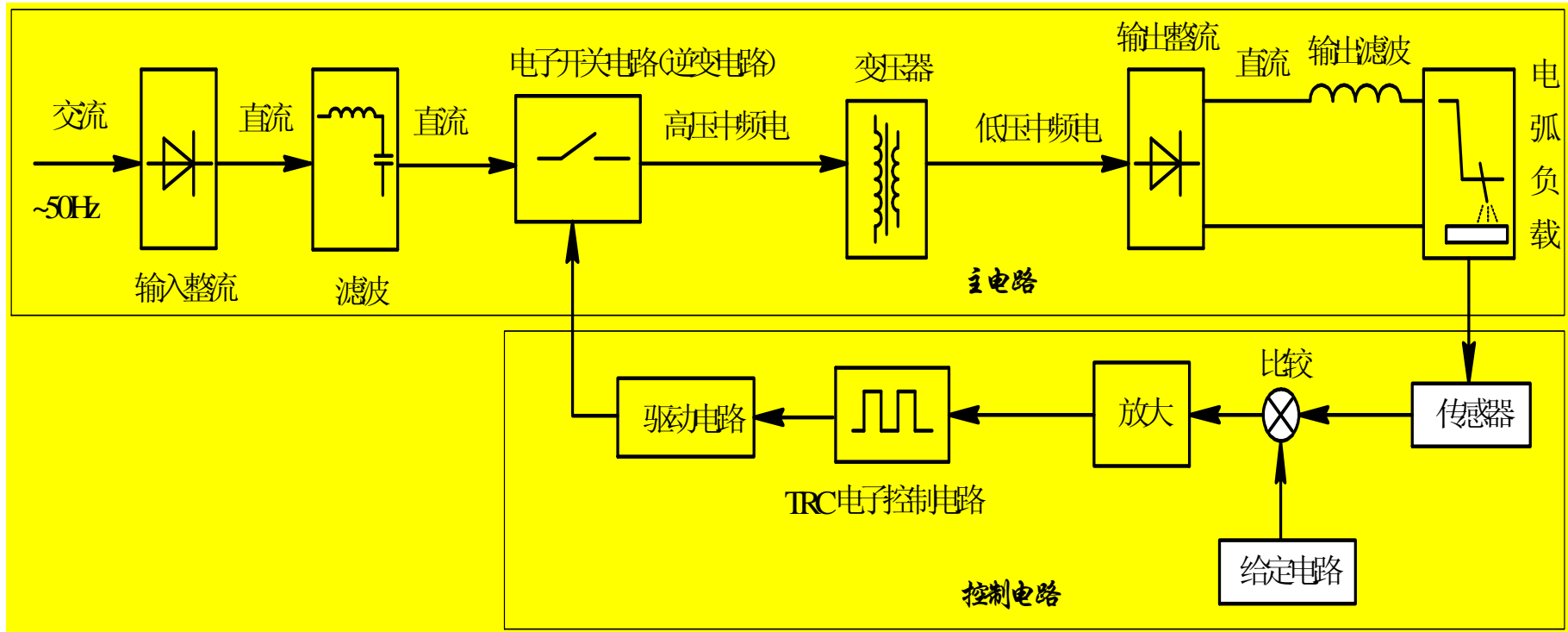


图7-1 逆变式弧焊电源电路结构图



7.1.2 逆变式弧焊电源的逆变形式

(1) **AC—DC—AC** 即交流→直流→交流。

这种逆变形式最终输出为交流电，交流电的频率为逆变器的逆变频率，远远高于工频。由于频率高的交流电传输的损耗较大，传输距离等受到限制，因此在实际弧焊电源中很少采用。

(2) **AC—DC—AC—DC** 即交流→直流→交流→直流。

这种逆变形式最终输出的是直流电，是目前大多数逆变式直流弧焊电源所采用的形式。

(3) **AC—DC—AC—DC—AC** 即交流→直流→交流→直流→交流。

这种形式有两次逆变，最终输出的是方波交流电。方波交流电的频率可以选择得较低，一般用于铝、镁及其合金材料的焊接。目前交流逆变式弧焊电源、变极性逆变式弧焊电源往往采用此种形式。



7.1.3 逆变式弧焊电源的分类



逆变式弧焊电源的分类方法有多种，例如，按照输出的电流种类不同分为直流逆变弧焊电源、交流逆变弧焊电源、脉冲逆变弧焊电源等；按照应用对象不同分为焊条电弧焊逆变电源、气体保护焊逆变电源、等离子弧焊逆变电源等。但最常见的分类方法还是根据电子功率开关的类型进行分类，因为电子功率开关是组成逆变器的核心元件，它能够反映逆变电源的某些特点。

目前用于逆变弧焊电源的电子功率开关器件主要有：晶闸管、晶体管、场效应管（MOSFET）和绝缘门极双极晶体管（IGBT）等。相应地，有晶闸管式逆变弧焊电源、晶体管式逆变弧焊电源、场效应管式逆变弧焊电源、IGBT式逆变弧焊电源等。

7.1.4 逆变式弧焊电源的特点

与普通弧焊电源相比，逆变式弧焊电源最显著特点是工作频率高，目前常见的IGBT式逆变式弧焊电源的逆变频率一般为20KHz左右。因此，逆变式弧焊电源具有许多特点：

1. 体积小、重量轻

普通弧焊电源的体积和重量主要集中在变压器和电抗器上，所占比例可达80%以上。在变压器设计中，根据有关电磁定律可以推出电压 U 与变压器工作频率 f 、铁心截面 S 、铁心材料的最大磁感应强度 B_m 以及绕组匝数 N 之间的关系：



$$U \propto fNB_m S$$

B_m 的大小与变压器铁心的磁性材料有关，磁性材料确定后， B_m 也就确定了。当输入电压 U 确定后，变压器的工作频率 f 与变压器线圈匝数 N 和铁心截面 S 的乘积成反比。当 f 大幅度提高时， NS 就会大幅度下降，相应的变压器体积和重量也大幅度减小。由于逆变弧焊电源中的逆变频率远远高于工频，因此，其变压器的体积和重量会大大减小。而且逆变频率越高，变压器体积和重量减小得越多。

同理，工作频率大幅度提高，电抗器的体积和重量也会大幅度减小。

由此可见，变压器和电抗器体积、重量的大幅度减小，将使逆变式弧焊电源本身的体积和重量大幅度减小。例如：一个额定电源为300A的逆变式弧焊电源重约35Kg，体积0.06m³；而一个相同额定电流的晶闸管弧焊整流器重约180Kg，体积0.65m³。由表7-2可以看到逆变式弧焊电源与常用传统弧焊电源体积与重量之间的比较。

逆变式弧焊电源较小的重量和体积为其生产、运输、使用等提供了极大的方便，尤其适用于流动及高空作业。



2. 高效节能

逆变式弧焊电源的变压器和电抗器的体积和重量大大减小，相应的铁损(铁心磁损耗)和铜损(导线耗能)也随之减小；又因逆变频率高，通电周期小，变压器的励磁电流很小；逆变式弧焊电源半导体功率开关器件工作于开关状态，比工作于模拟状态的半导体功率器件的功耗小。因此，逆变式弧焊电源效率高，功率因数高，节约电能，可减少配电容量。表7-2也列出了逆变式弧焊电源与常用传统弧焊电源有关效率、功率因数等参数的比较。

型号规格	AX7-400 直流弧焊发电机	ZXG-400 磁放大器式硅 弧焊整流器	ZX5-400 晶闸管式弧焊 整流器	ZX7-400 晶闸管式弧焊 逆变器	ZX7-400 IGBT式弧焊 逆变器	
额定输出电流(A)	400	400	400	400	400	
额定负载持续率(%)	60	60	60	60	60	
输出空载电压(v)	60~90	80	63	70~80	75	
输入电压(v)	3φ380	3φ380	3φ380	3φ380	3φ380	
效率(%)	53	75	74	85.7	≥90	
cosφ	0.9	0.55	0.75	≥0.90	≥0.95	
重量(Kg)	370	310	220	66	33	
外形尺寸(mm)	长	950	690	594	540	550
	宽	590	490	495	355	320
	高	890	952	1000	470	390

表7-2 逆变式弧焊电源与传统弧焊电源主要技术指标



3. 动特性好、控制灵活

普通的弧焊电源工作频率为工频或其倍频，控制周期较长，回路中保持电流稳定的输出电抗器电感较大。即使是晶闸管双反星型式弧焊整流器的工作频率也仅为六倍工频，控制周期为**3.3ms**。而逆变式弧焊电源的工作频率很高，例如**20KHz**工作频率的逆变弧焊电源的控制周期可达**50 μ s**；且因工作频率高，焊接回路中起滤波作用的电感值也较小，从而使整个回路的时间常数减少，控制过程的动态响应速度加快。

逆变式弧焊电源的外特性、动特性等性能主要由电子控制电路进行调节。电子控制电路的变化和调整灵活、方便，易于在一台电源上实现多种特性的输出，甚至在焊接过程中也可以根据要求切换不同的特性。



4. 元器件特性要求高，电路复杂

逆变弧焊电源是典型的电力电子装置，是高精度电子控制电源，因此电路复杂。

普通弧焊电源工作频率低，一般工作波形为正弦波， du/dt 、 di/dt 较小。而逆变电源由于工作频率高，内部电流换向快，变化剧烈，对 du/dt 、 di/dt 等动态参数的影响十分明显。在这样严酷的工作条件下，逆变电源的电子功率开关等元器件被击穿、烧穿的可能性大大增加。为了保证逆变弧焊电源的可靠性、稳定性，不仅需要高质量、高性能的元器件，而且需要设计、应用许多保护电路。这也是逆变式弧焊电源控制电路复杂的重要因素之一。



7.2.1 逆变电路的基本型式



主要有单端式，推挽式，半桥式以及全桥式四中逆变主电路结构。其中全桥式电路应用最广泛。

1. 单端反激式逆变电路

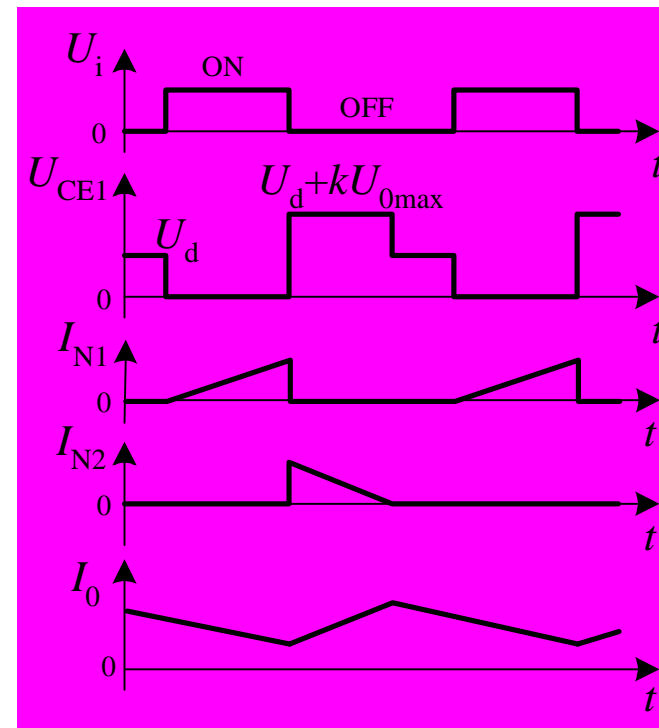
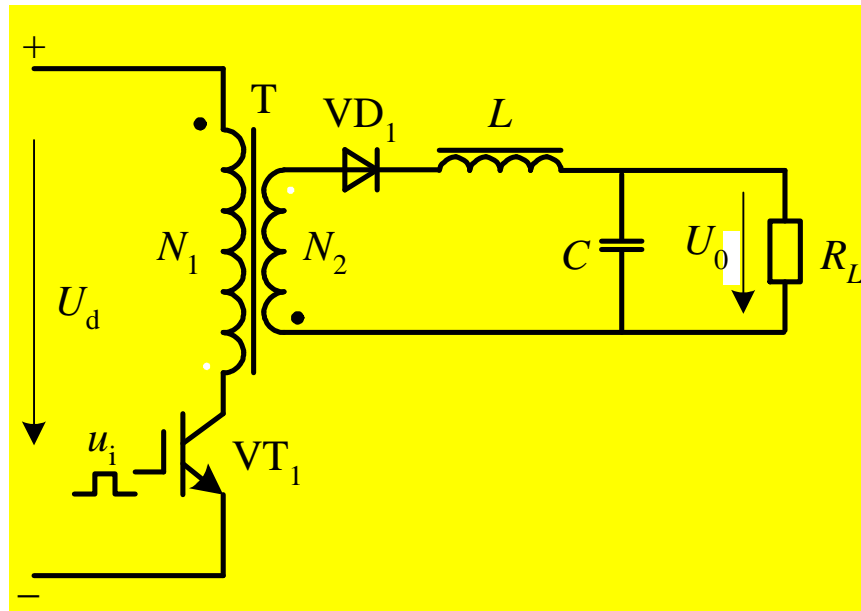


图7-2 单端式逆变电路

a) 逆变电路原理图

b) 波形图



由于这种变换器在电子功率开关导通期间只存储能量，在关断期间才向负载传递，中频高压器在工作过程中既是变压器又相当于一个储能用电感，因此称之为“电感储能变换器”。

2. 单端正激式逆变电路

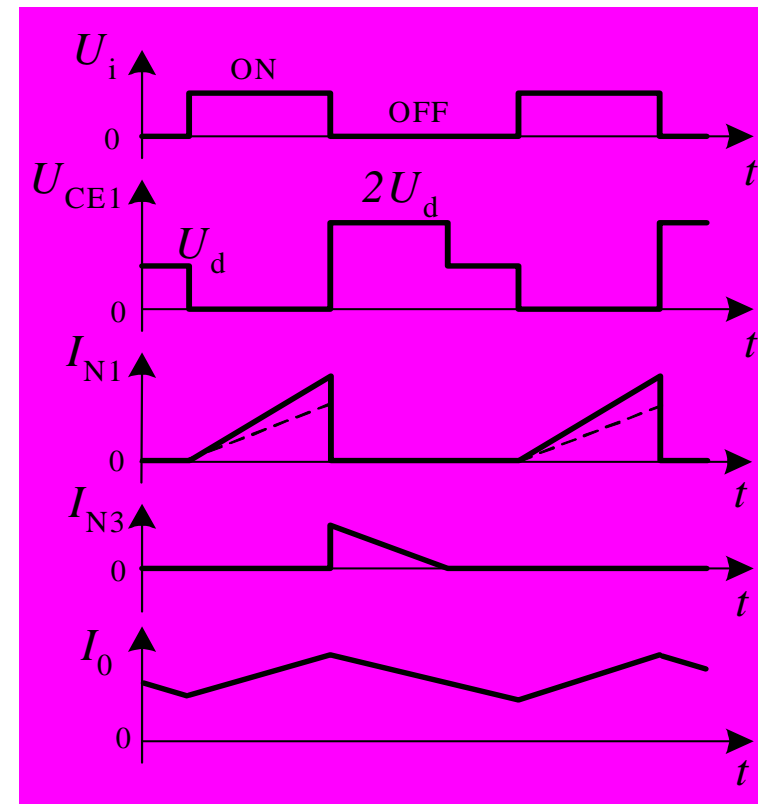
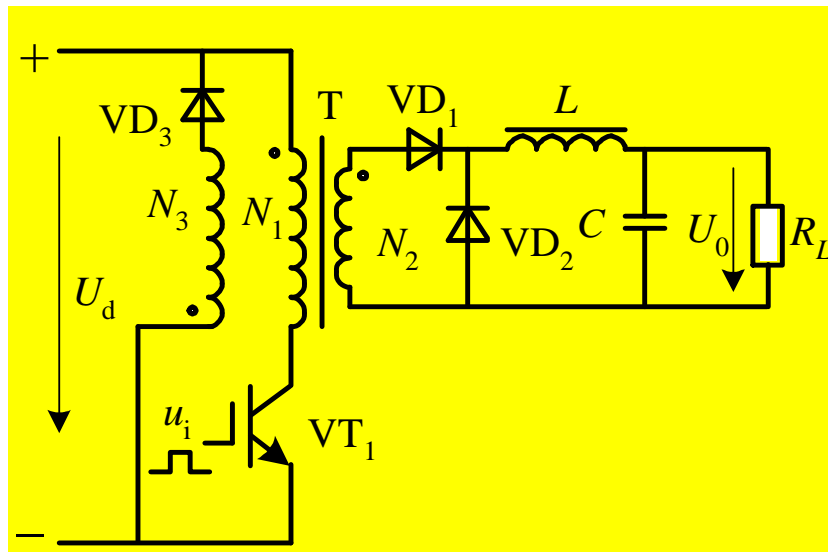


图7-3 带有祛磁绕组和二极管箝位的单端正激逆变电路
a) 逆变电路原理图

b) 波形图



更常见的单端式逆变电路

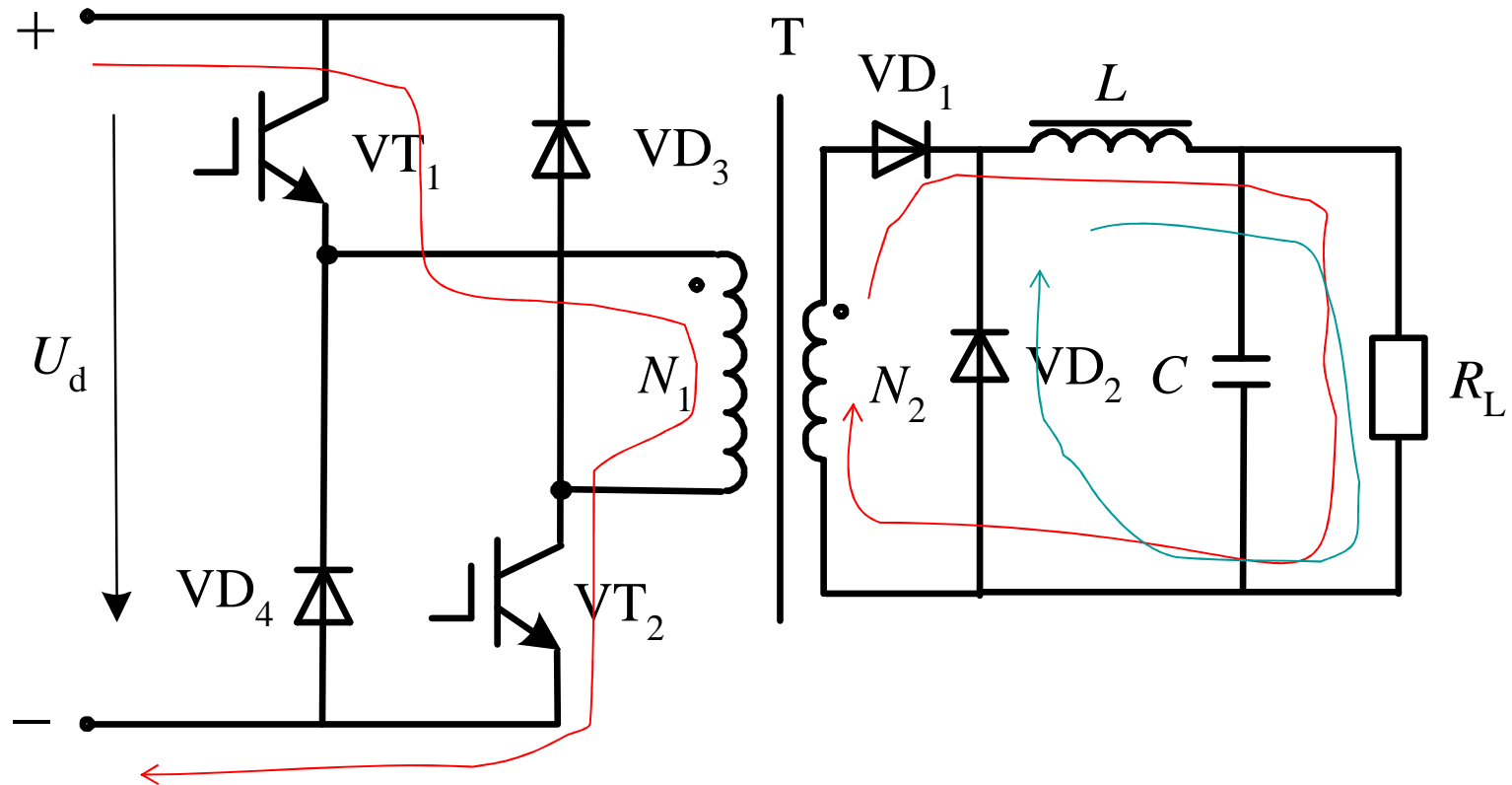
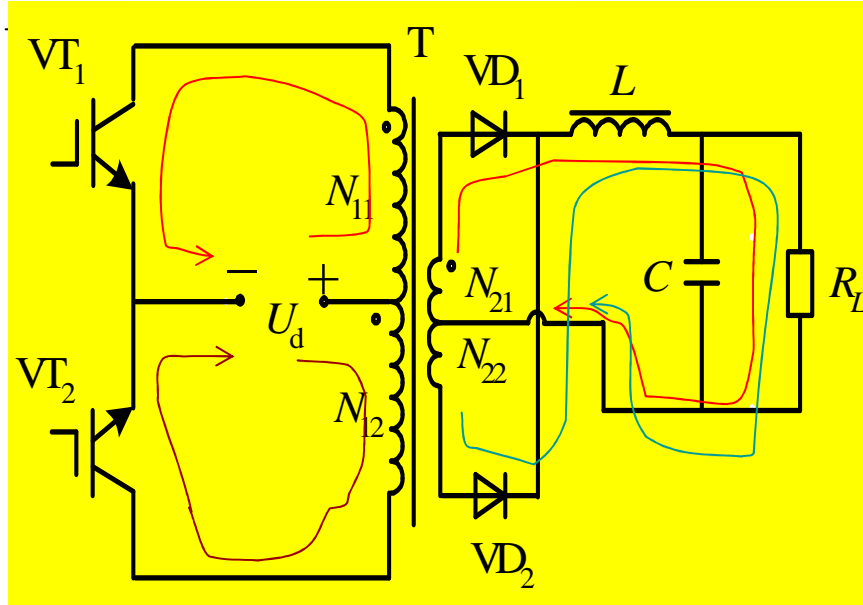


图7-7 双电子功率开关单端式逆变电路



3. 推挽式逆变电路



a) 逆变电路原理图

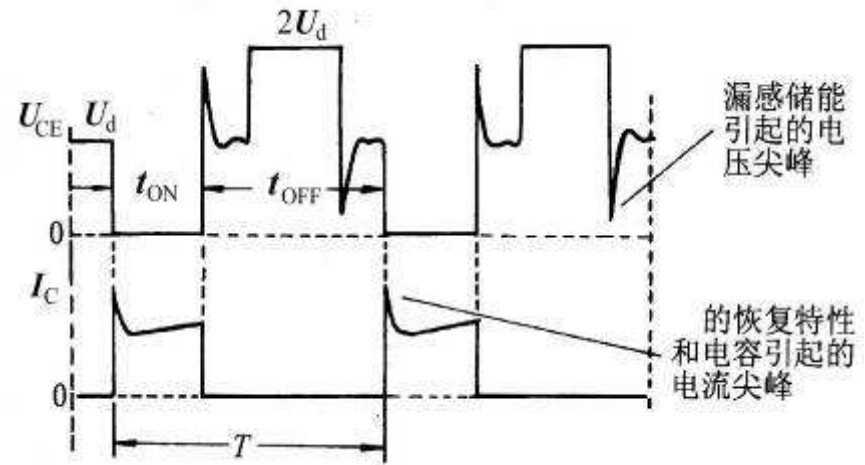


图7-4 推挽式逆变电路

b) 波形图

推挽式逆变电路每次IGBT导通，变压器一次绕组只有一半工作，变压器利用率较低；电子功率开关IGBT所承受的最大电压为 $2U_d$ ，比全桥式，半桥式，甚至单端式电路中的IGBT所承受的电压都要大，对电子功率开关的选择造成困难。因此这种电路适于中小功率的逆变电源，在逆变式弧焊电源中很少被采用。



4. 半桥式逆变电路

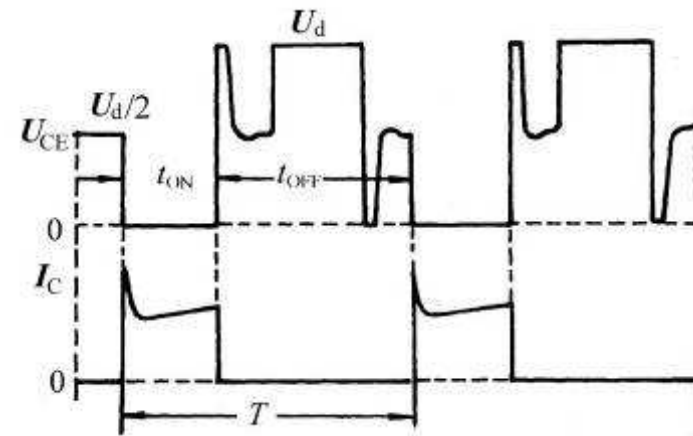
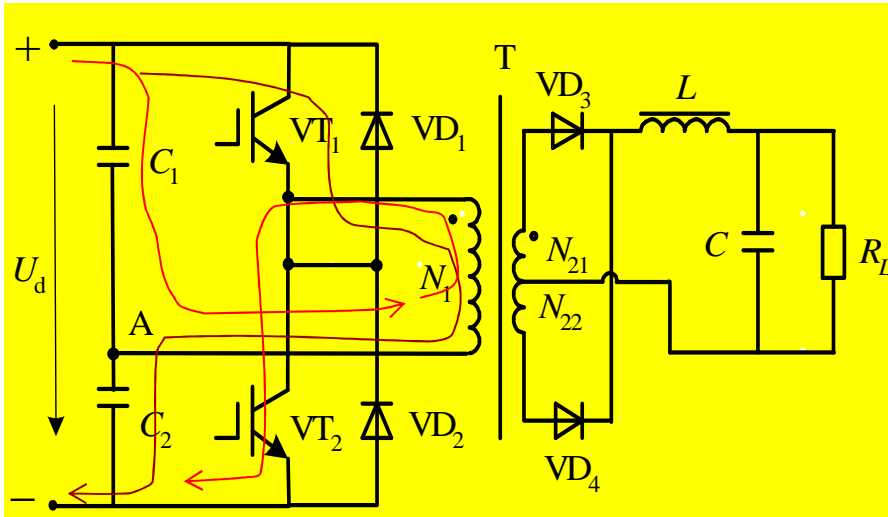


图7-5 半桥式逆变电路

a) 逆变电路原理图

b) 波形图

一般半桥逆变电路适于中等容量的输出，芬兰KEMPPI公司生产的MASTER350逆变弧焊电源就是采用了典型的半桥逆变电路的形式，国内许多厂家的逆变弧焊电源也采用了半桥逆变电路的形式。



5. 全桥式逆变电路

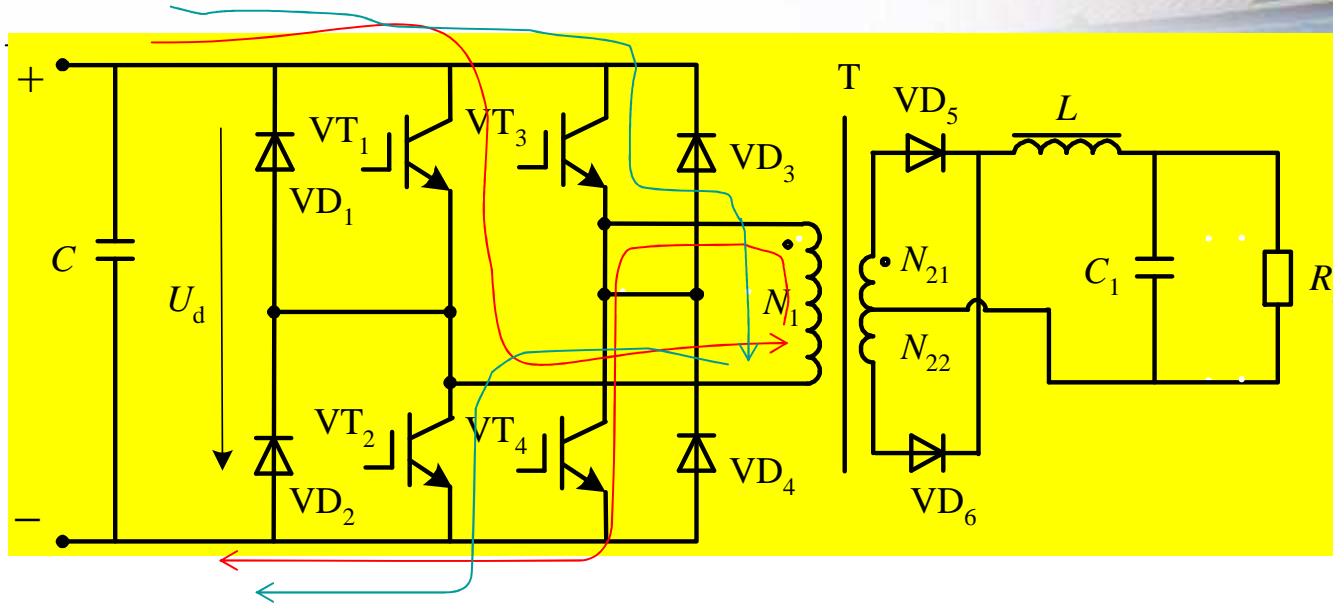
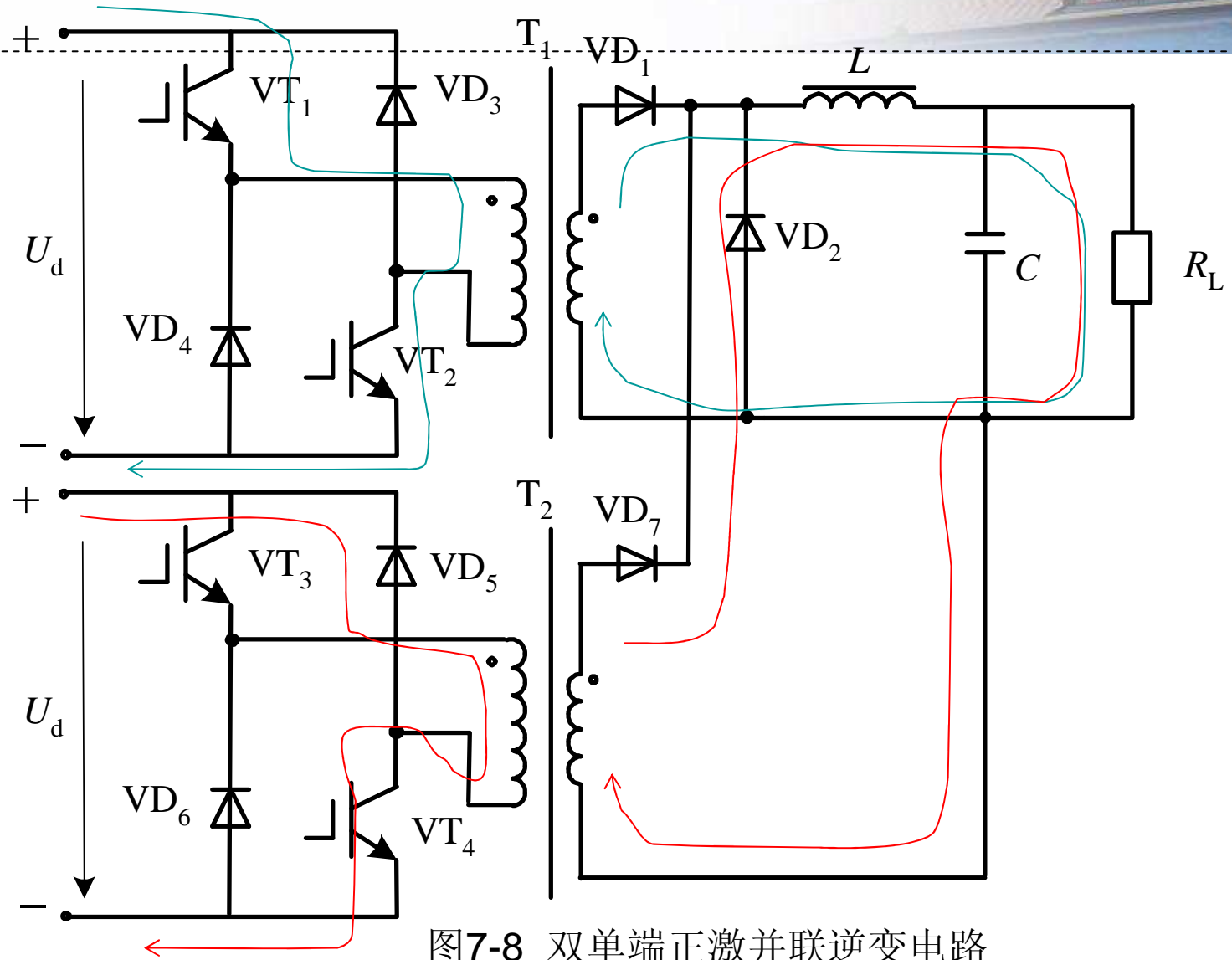


图7-6 全桥式逆变电路原理图

由于输入整流电压 U_d 直接作用于变压器上，变压器工作在磁滞回线的正反两侧，利用率高，适用于大、中功率输出。美国MILLER公司生产的XMT-300系列的逆变弧焊电源就是采用的全桥逆变电路，国内许多厂家生产的逆变弧焊电源也都采用全桥逆变电路。但该逆变电路中需要四只（组）电子功率开关，驱动电路较为复杂，抗不平衡能力较差。





7.2.2 各种逆变电路的特点与应用



1. 单端逆变电路的特点与应用

单端电路的优点：

功率开关器件少，电路简单；不存在开关管的直通问题，工作可靠性高；变压器单向工作，反而不存在电路不平衡造成的偏磁饱和问题。

单端逆变电路的缺点：

- 1) 与半桥、全桥逆变电路相比，其功率开关管承受的电压高；
- 2) 由于变压器是单向工作，可利用的铁心的磁通变化量小，因此铁心利用率低，变压器体积大；
- 3) 功率传输的占空比小，一般不到0.5，所以输出功率小。



2. 双端逆变电路的特点与应用

1) 推挽式电路所用的功率开关器件少，输出功率大，但开关管的电压高，适用于直流输入电压比较低的逆变器。由于逆变弧焊电源的输入电压较高，功率较大，因此，该电路在逆变弧焊电源中应用较少。

2) 半桥式电路所用的功率开关器件少，开关管的电压不高，驱动脉冲电路简单，抗电路不平衡能力强，但电路中需要两个大电容器，而且输出功率较小，适用于中小功率的逆变器。因此，该电路在逆变弧焊电源中得到较多地应用。为了增大输出功率，也可以采用双半桥逆变电路的并联，其形式类似于双单端正激并联逆变电路，即输入输出分别并联，美国飞马特公司生产的300系列逆变弧焊电源就是采用了双半桥逆变电路的并联形式。

3) 全桥式电路中的功率开关管的电压不高，输出功率大，但所用功率开关器件较多，驱动电路比较复杂，适用于大功率的逆变器。因此，该电路在逆变弧焊电源中应用较多。



表7-3 逆变电路性能比较

型式 项目	推挽式	全桥式	半桥式	单端式 (两IGBT, 二极 管箝位)
IGBT集射 极间最大 电压	稳态为 $2U_d$, 瞬 态过程二极管 箝位于 $2U_d$	稳态为 U_d , 瞬态过程二 极管箝位于 U_d	同全桥 式	截止期二极管箝 位于 U_d
相同输出 功率时集 电极电流	I_c	I_c	$2I_c$	$2I_c$
中频变压 器上施加 的电压	U_d	U_d	$U_d/2$	U_d
IGBT数量	2	4	2	2
滤波电容 数量	1	1	2	1



电子功率开关参数比较



器件特性	晶闸管 (SCR)	可关断晶闸管(GTO)	晶体管(GTR)	场效应管 (VMOS)	IGBT
开关速度(μs)	25~100	6~25	1~5	0.1~0.5	0.5~1
安全工作区 (SOA)	大	大	小	大	大
额定电流密度(A/cm^2)			20~30	5~10	50~100
驱动功率	大	大	大	小	小
驱动方式	电流	电流	电流	电压	电压
高压化	易	易	易	难	易
大电流化	易	易	易	难	易
高速化	难	难	难	极易	易
饱和压降	低	低	极低	高	低
并联使用	难	难	较易	易	易
其他	不能自关断	拖尾电流限制频率提高	二次击穿现象限制了SOA	无二次击穿现象	擎住现象限制了SOA



死区设置



相串联的桥臂上的功率开关管顺序导通要间隔一段时间再开通，这段时间有一个最小值限制，这个最小时间间隔称为死区。设置死区的目的就是防止相串联的桥臂上的功率开关管直通。

设置死区时间应大于电子功率开关的关断时间，才能有效避免直通现象的产生。如图7-10所示，脉冲宽度占空比最大时，两脉冲之间的间隔即为死区。

在脉冲宽度控制(PWM控制)方式中，通过限制最大脉宽，即可设置死区；在脉冲频率控制(PFM控制)方式中，通过限制最大频率，即可限制死区。

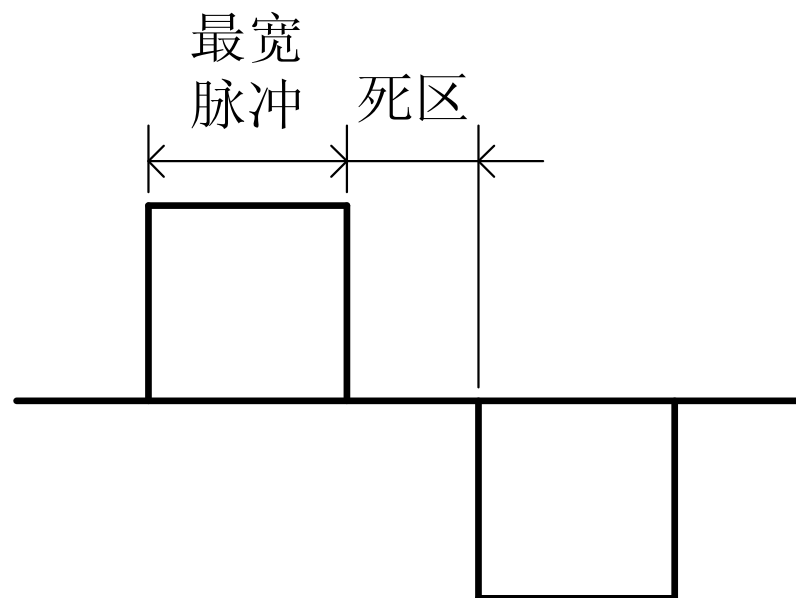


图7-10 死区设置示意图



7.2.4 变压器

电网的隔离、功率传输、降压

与普通的变压器相比，逆变式弧焊电源中的中频变压器工作频率很高，一般为2~30KHz，而且为矩形波脉冲，因此在磁性材料的选择以及工作原理等方面具有不同的特点。

1. 磁性材料

目前常用的磁性材料有硅钢片、铁氧体、非晶态合金、微晶合金等。

(1) 硅钢片 硅钢片又称矽钢片、电工钢片，是用硅钢材料轧制成的薄片。硅钢片的最大优点：一是饱和磁感应强度高（可达1.8T以上）；二是居里温度高；三是价格比较低。硅钢片的缺点是电阻率低，高频损耗很大。

逆变频率较低的晶闸管式逆变弧焊电源（工作频率0.5~5kHz），其变压器可采用单片厚度为0.2mm或0.1mm的薄硅钢片。对于逆变频率更高（20kHz以上）的弧焊电源，普通硅钢片的厚度应为几十微米，加工难度大。

(2) 铁氧体软磁材料 铁氧体又称铁淦氧、磁性瓷，是铁和其它金属元素的复合氧化物。软磁材料主要有镍-锌铁氧体、锰-锌铁氧体等。

与硅钢片相比，铁氧体的饱和磁感应强度不高（一般仅为0.4T），居里温度仅为120℃左右，而且力学性能脆弱，易裂易碎。但它的电阻率高（ $10^2 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ，一般金属为 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ），是硅钢片的 10^6 倍以上。因为它的高频损耗很小，所以可以用于工作频率较高(可达几百kHz)的变压器磁心。



(3) 非晶态和微晶磁性材料 非晶态磁性材料是以铁、钴、镍等第一过渡族元素为基，加入其它类金属（P、B、Si等易形成非晶的元素），经过高温熔化，快速冷却（ $>10^5\text{°C/s}$ ），再经磁化热处理而得到的长程无序、短程有序、无晶界(处于液相组织的亚稳定态)的玻璃态合金。它保留了液体的排列状态，原子在空间的排列无秩序，不存在宏观的磁各向异性，具有优异的磁性能。非晶态合金经热处理可以变成微晶合金，磁性能有所提高。

非晶态磁性材料的饱和磁感应强度较高（ $0.6\sim 1.5\text{T}$ ），居里温度可达 $350\sim 700\text{°C}$ ，电阻率可达 $120\sim 150\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ，为硅钢片的3倍，尤其是它的矫顽力（ H_c ）很小，所以其铁损小。

非晶态及微晶磁性材料用于逆变式弧焊电源中的变压器磁心，其工作频率可达 50kHz ，一般应用在 $20\sim 50\text{kHz}$ 范围内，由于这类材料目前成本还比较高，因此其应用受到限制。

目前逆变式弧焊电源应用较多的是铁氧体磁性材料，形状有E形、矩形和环形。例如，ESAB的LHL315使用的是E形铁心，LINCON的V300系列、KEMPPI的MASTER350系列使用的是矩形磁心。



2. 电磁定律的应用

3. 集肤效应

交变电流通过导线时会产生集肤效应，表现为导体中的电流密度由导体的表面向中心越来越小，并呈指数规律下降。交变电流的频率越高，集肤效应越强烈。这就意味着导线的有效截面减小，导通电阻增大。

集肤效应的强度可用穿透深度 Δ 来表征，其含义是：交变电流沿导线表面开始，向内所能达到的径向深度，它所具有的横截面即是导线的有效截面。 Δ 与电流交变频率 f 、导线磁导率 μ 和电导率 γ 有关：

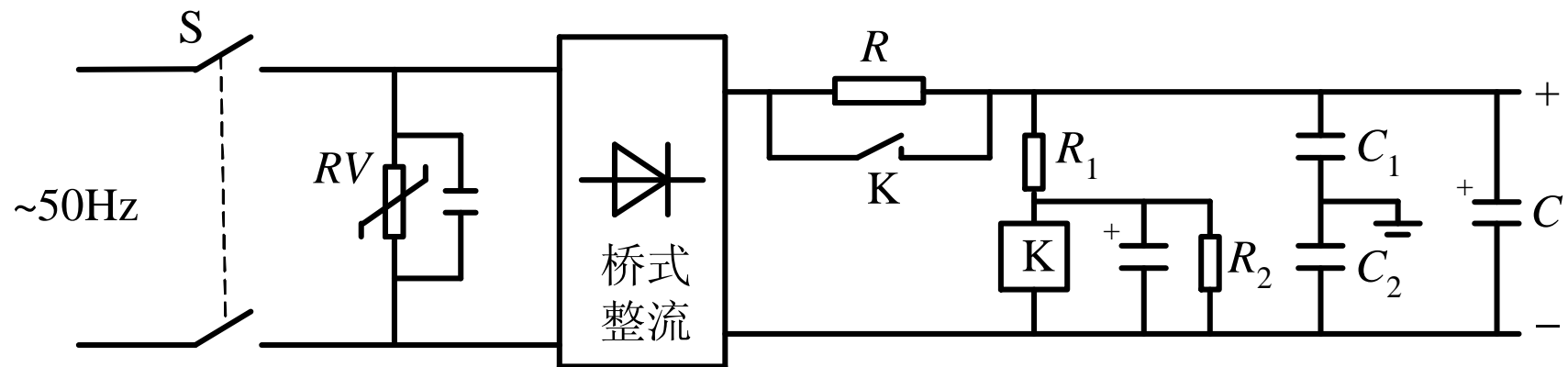
$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}$$



7.3 输入输出电路

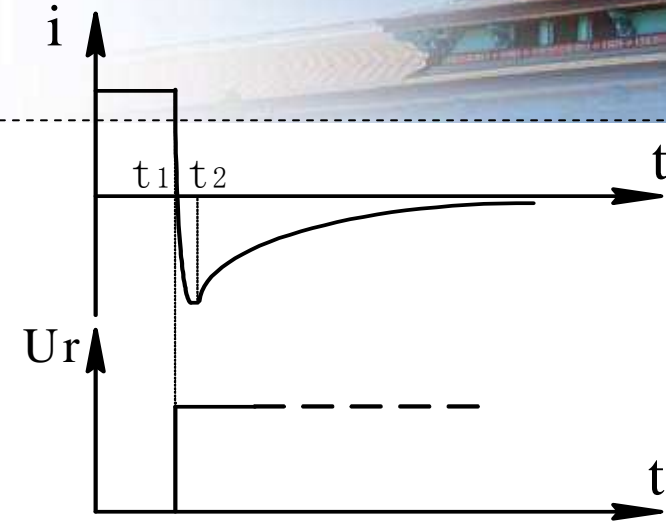
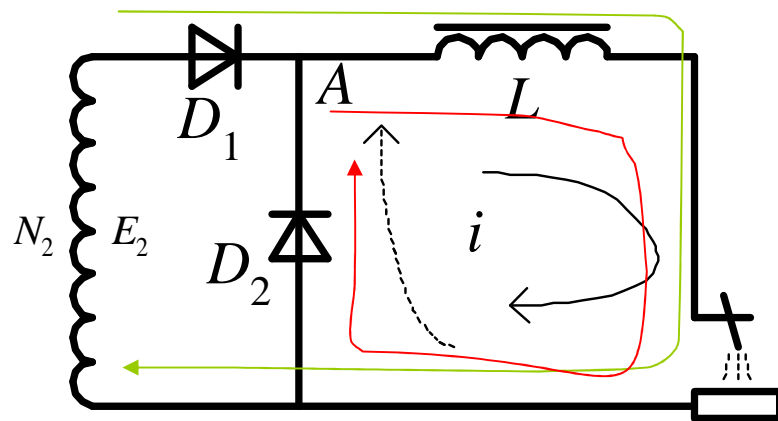
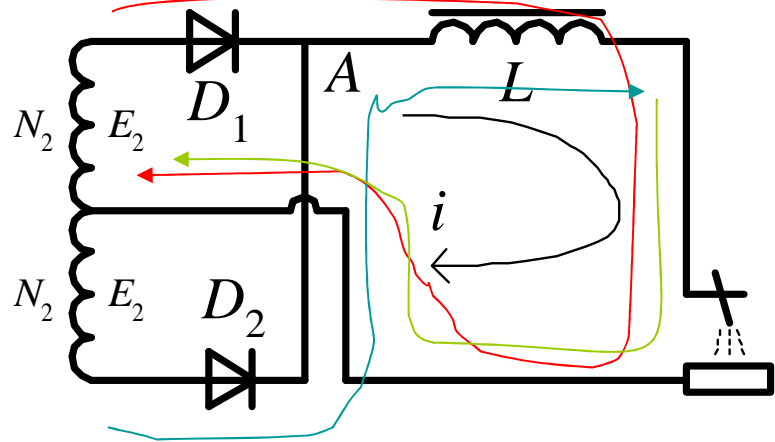


7.3.1 输入整流滤波电路

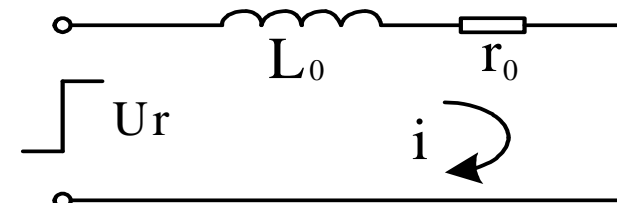




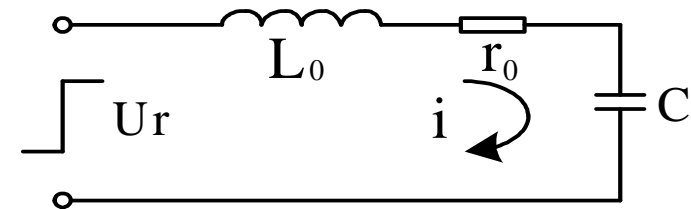
7.3.2 输出整流滤波电路



(a) 反向恢复波形



(b) 反向恢复初期等效电路



(c) 反向恢复后期等效电路



表7-5 快恢复二极管特性比较

性能类型	反向恢复时间	反向耐压	电流容量	正向电压	反向漏电流
掺金扩散型	大	高	大	大	较大
外延型	小	高	大	较小(0.85v)	较大
肖特基型	很小(150ns)	低	较大	很小(0.55~0.65v)	大(数十mA)
PIN型	小(200ns)	高	大	小(0.6~0.85v)	小(1mA左右)

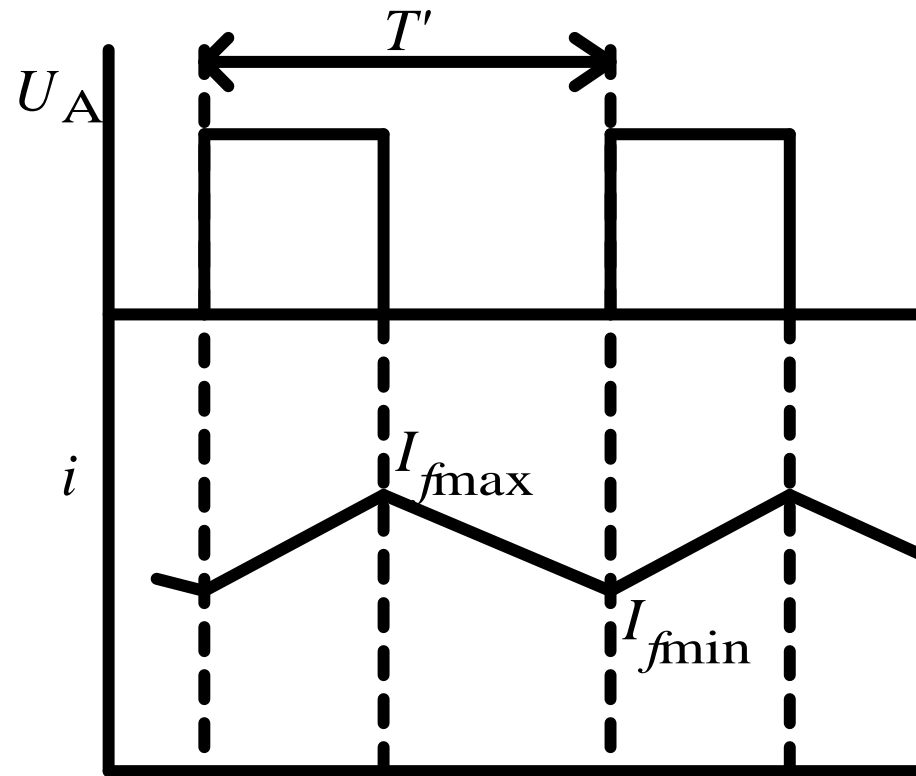


图7-14 电抗器滤波过程



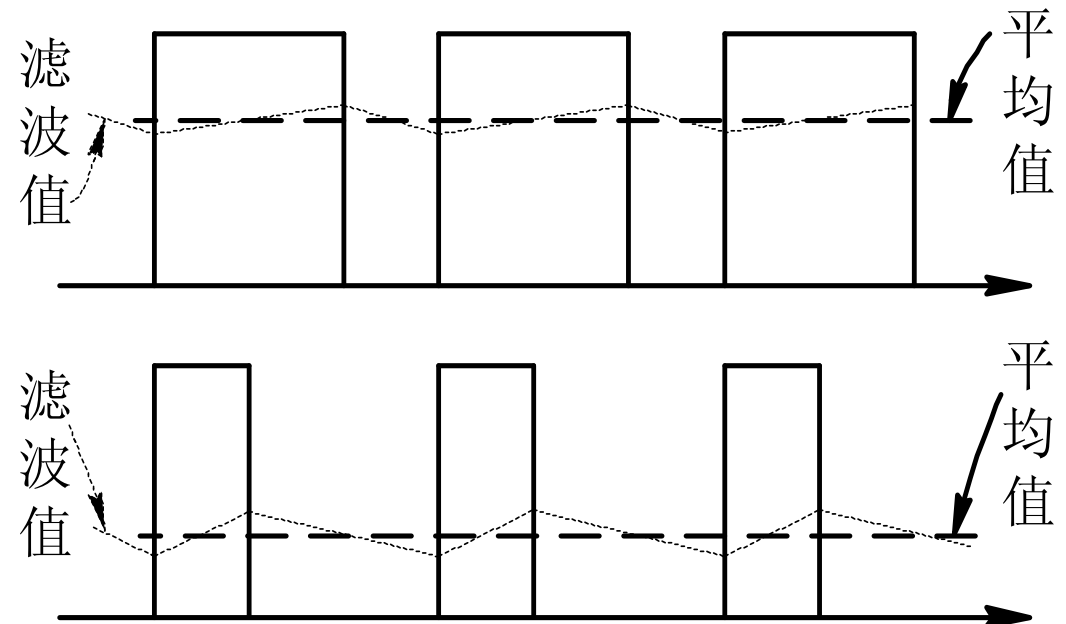
7.4 时间比率控制及驱动电路

逆变式弧焊电源对能量输出的控制是通过逆变电路中的电子功率开关的通断来实现的。电子功率开关的通断是由时间比率控制（**time ratio control**，简称为**TRC**）电路产生的脉冲信号进行控制的，也就是说，逆变式弧焊电源采用了**TRC**控制。**TRC**控制通常有三种形式

PWM **PFM** **PWM+PFM**

1. PWM控制

PWM（**pulse width modify**）控制即脉冲宽度控制方式，也可以称为“定频率调脉宽”控制方式。此控制方式是在频率不变的条件下，调节脉冲宽度来调节逆变器的输出能量。

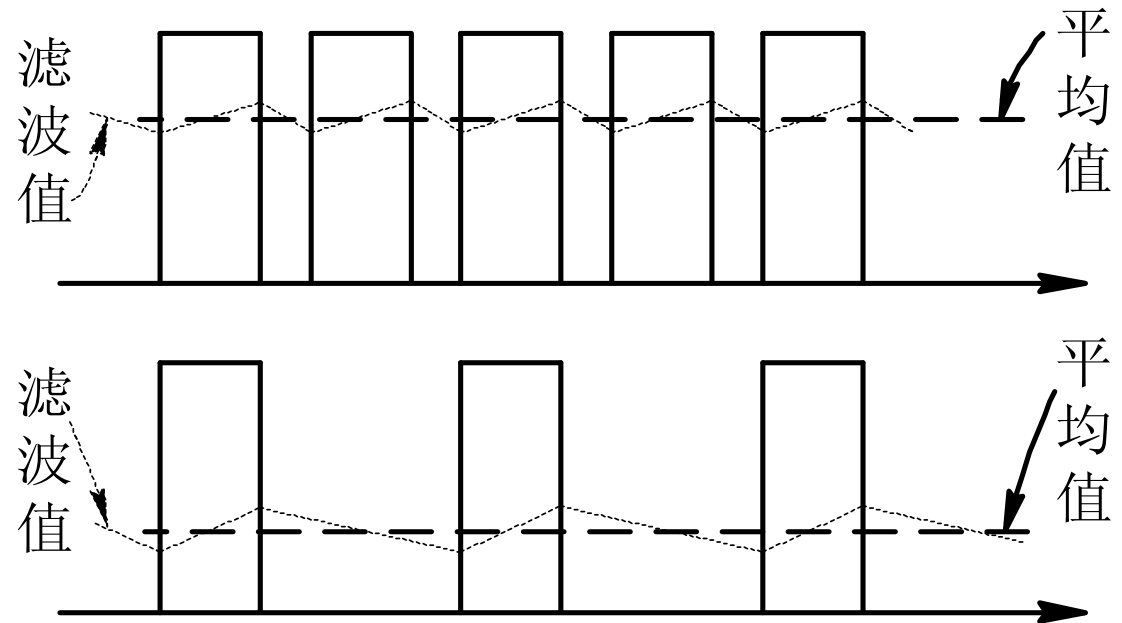




2. PFM控制



PFM (pulse frequency modify) 控制, 即脉冲频率控制方式, 也就是“定脉宽调频率”控制方式。PFM 控制是在脉冲宽度保持不变的条件下, 通过改变脉冲频率来调节逆变器的输出。



7.4.2 PWM控制器

PWM方式更常见, 有多种IC芯片, 如: 3525、3846、3524等

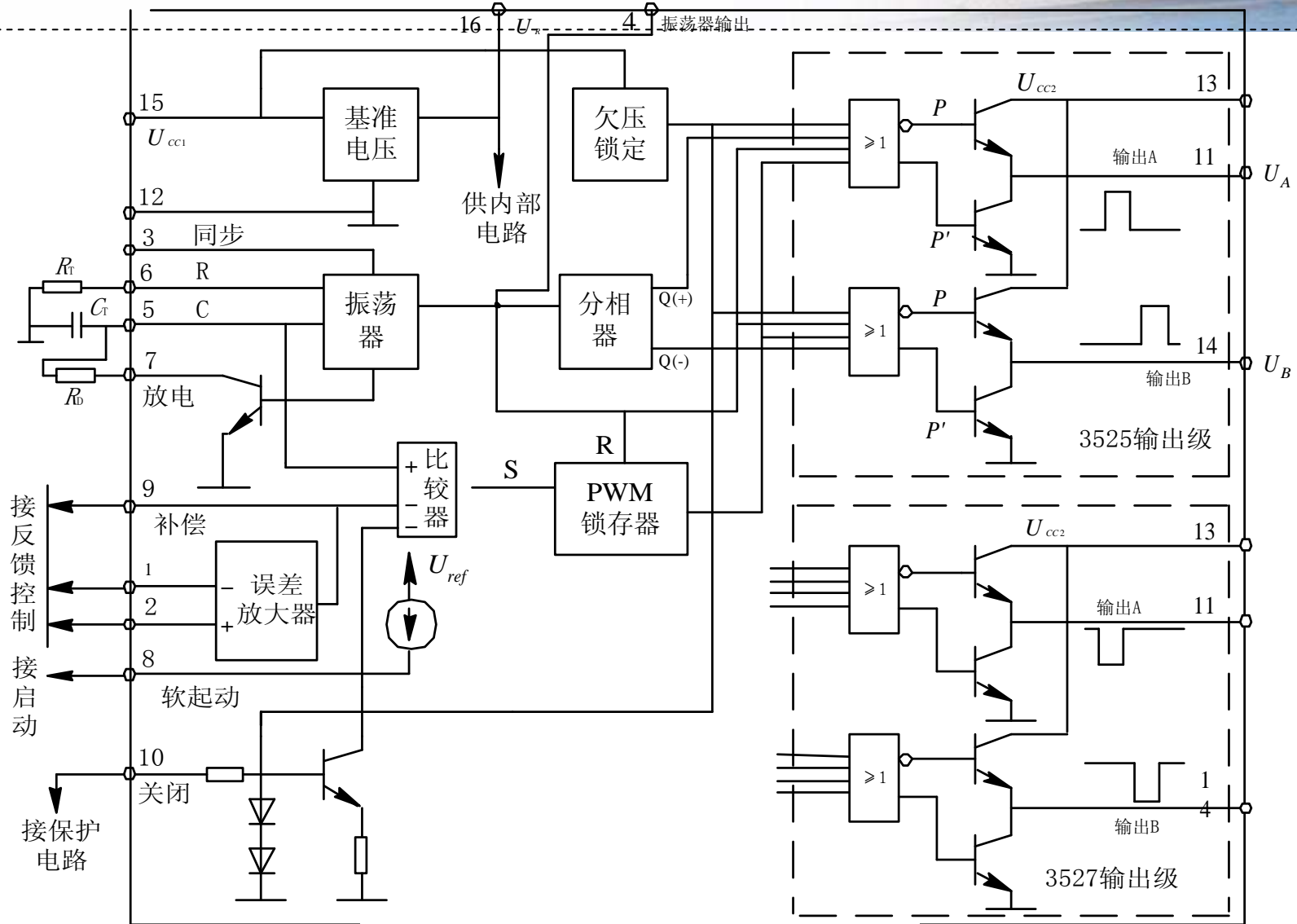


图7-20 SG3525的内部结构图 *ials Science & Engineering, Tianjin University*

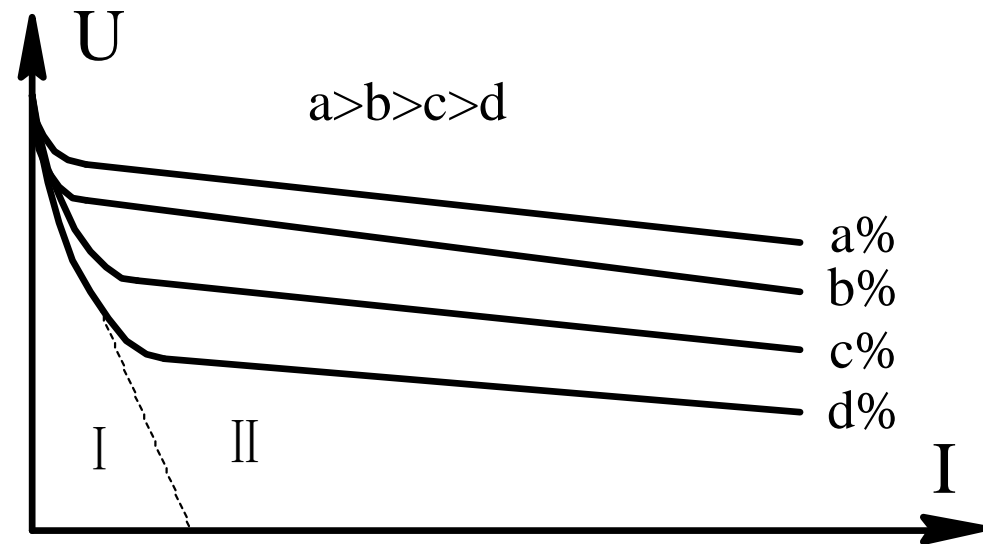


7.5 逆变式弧焊电源的特性控制

对外特性、调节特性、动特性等特性的控制主要是在电源自然输出特性的基础上，通过时间比率的调节来实现的。

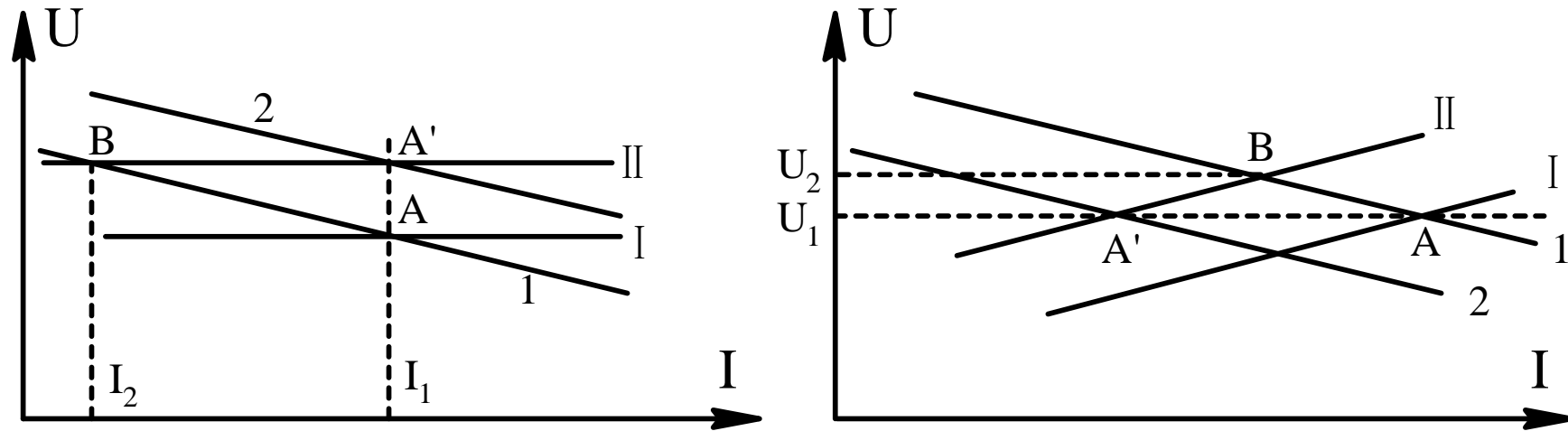
7.5.1 电源的自然输出特性

电源自然输出特性是指在无反馈控制的开环条件下，电子功率开关的通断时间比率保持不变，电源输出的特性。通常用脉冲占空比来表示，即脉冲峰值时间在整个脉冲周期中所占的比例，也就是电子功率开关的导通时间在开关通断周期中所占的比例。





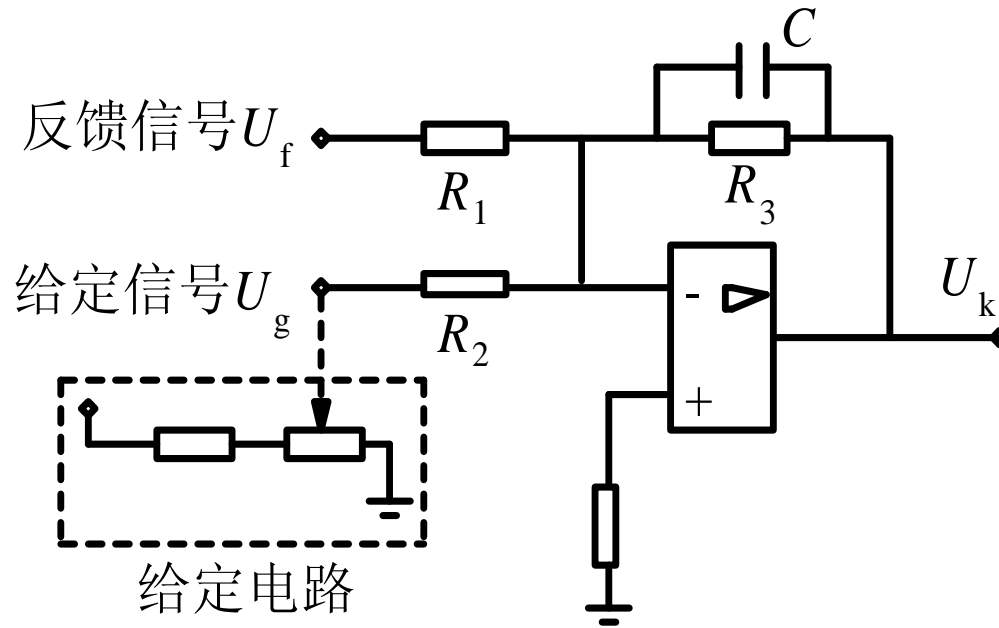
7.5.2 外特性控制



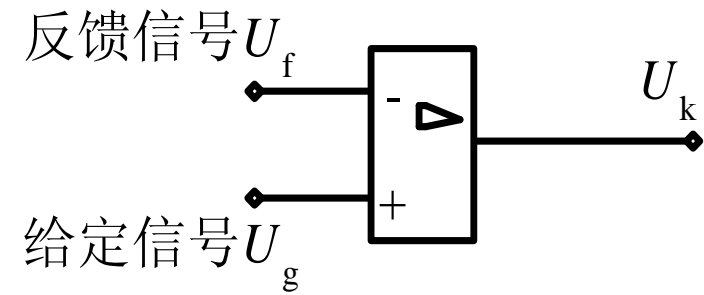
上述两种控制只是最基本的控制模式。若两种方式结合，则可以获得有一定斜率的外特性曲线，也可实施分段控制，使不同的段获得不同的外特性，图7-32是几种实际的逆变式弧焊电源的外特性曲线形式，其控制原理参见本书的5.3节。



常见的弧焊电源中比较放大电路原理图



(a)



(b)

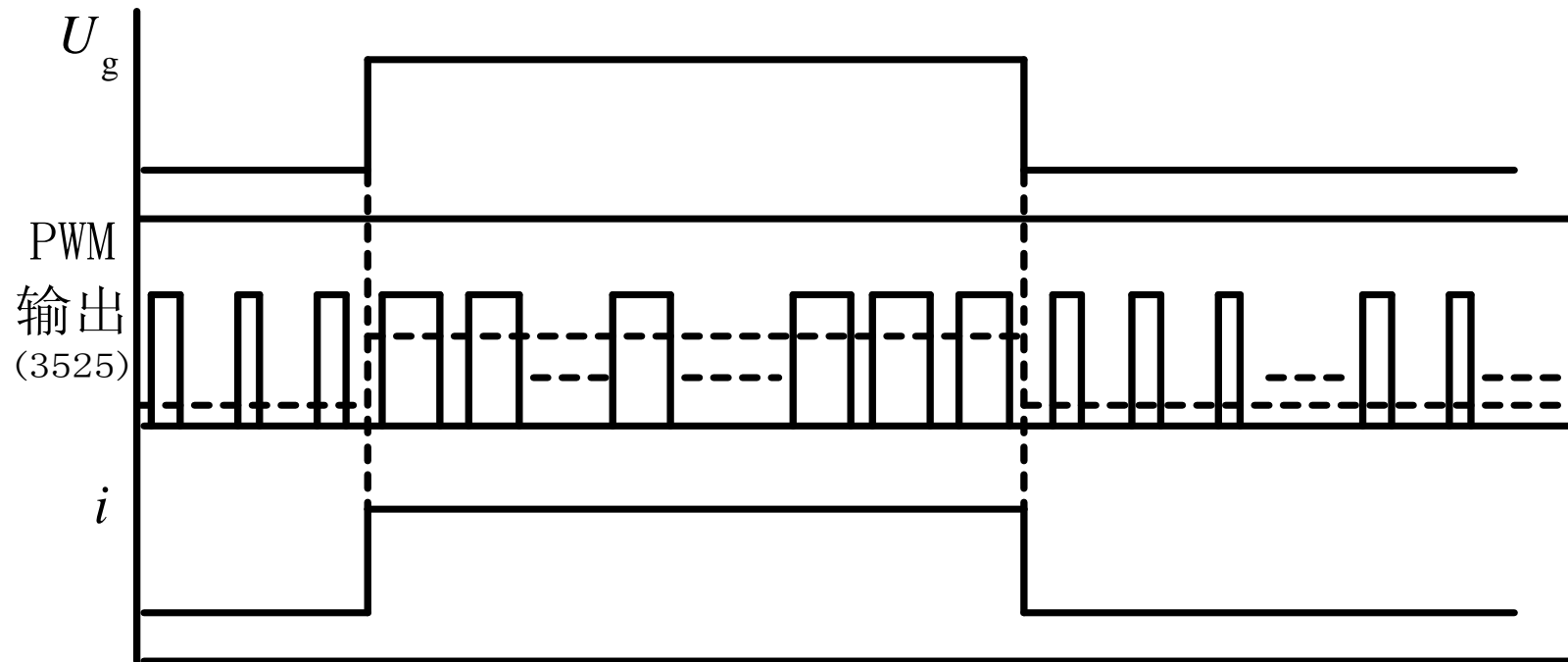
$$U_K = -\left(\frac{R_3}{R_1} U_f + \frac{R_3}{R_2} U_g\right)$$



7.5.3 调节特性控制

对于逆变式弧焊电源来说，利用其电子控制的灵活性，改变给定电路中的给定信号 U_g ，可以调节外特性曲线的位置。如果是平特性电源，给定信号 U_g 的变化将改变平外特性曲线的上下位置；如果是下降特性的电源，给定信号 U_g 的变化将改变下降外特性曲线的左右位置。

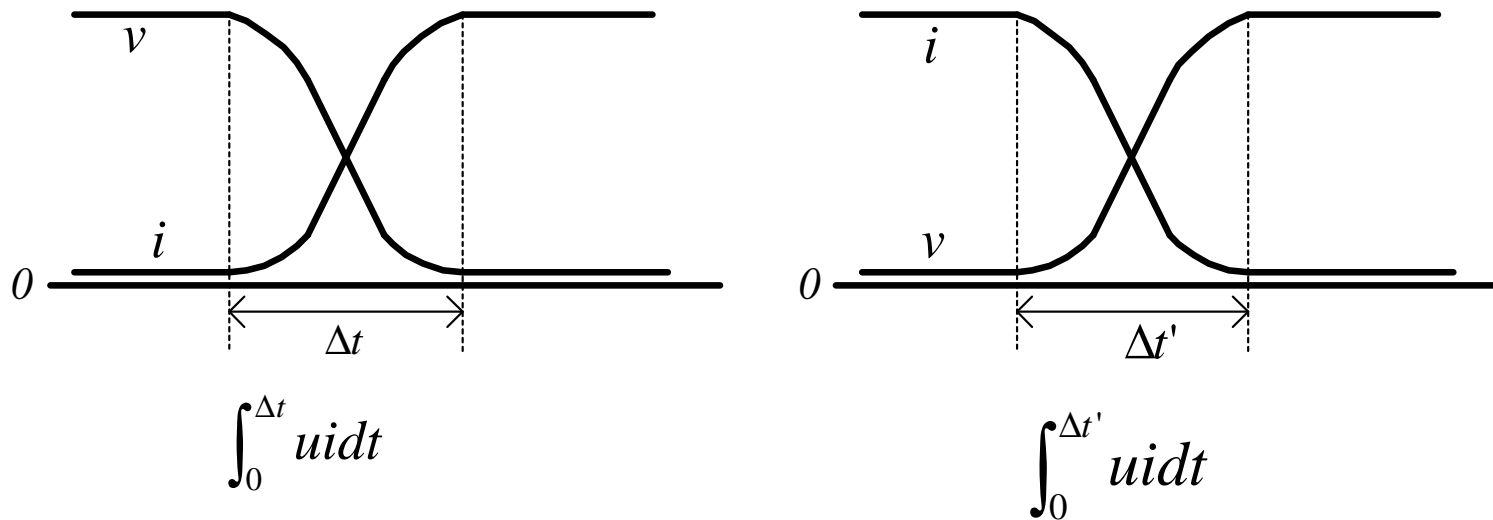
在焊接过程中，如果 U_g 以脉冲形式变化，则输出电流也将是脉冲电流。 U_g 的脉冲变化频率不得超过PWM频率即逆变频率， U_g 的脉冲变化对输出电流的影响必须通过频率更高的PWM环节实现，即所谓的“在高频基础上的低频调制”，其波形如图7-36所示。





7.7 软开关IGBT逆变式弧焊电源（简介）

包括逆变式弧焊电源在内的开关式弧焊电源，有硬、软开关之分。“硬开关”是指功率开关器件工作在被强迫关断（电流不为零）或强迫导通（电压不为零）的状态下。由于目前大多数逆变电源或开关电源都采用了PWM控制技术，因此又称为硬开关PWM控制逆变电源或开关电源。硬开关逆变弧焊电源功率开关的导通和关断往往是在工作电流、电压不为零，甚至是较大值的状态下进行的。



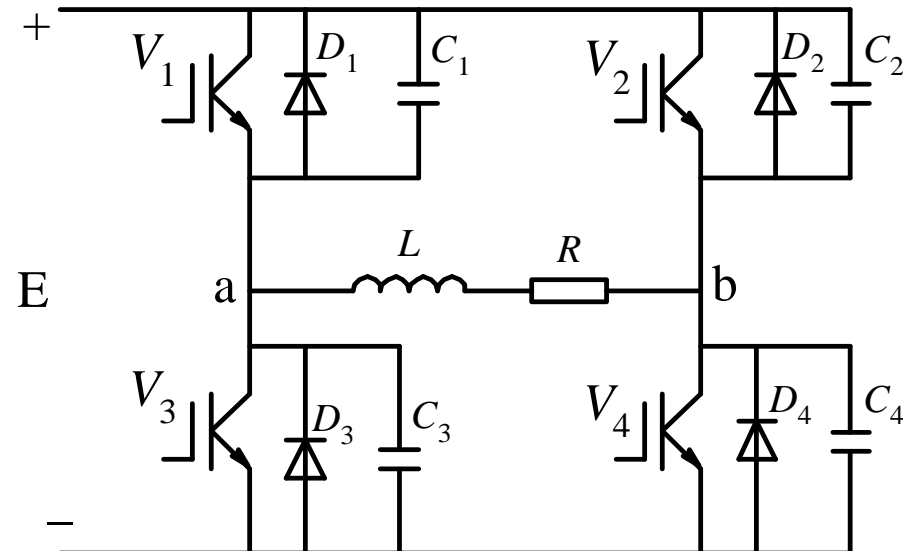


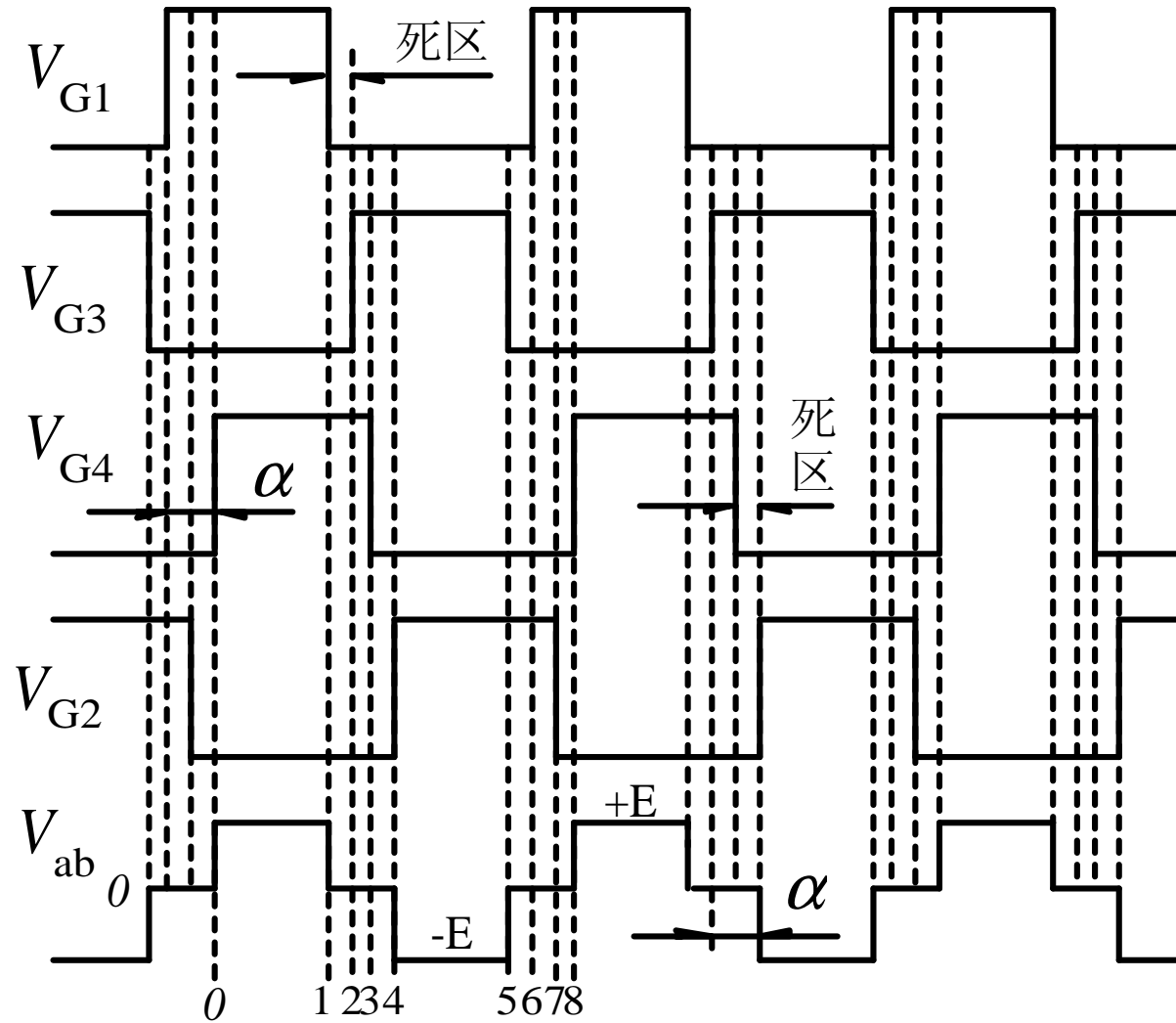
硬开关逆变电源的开关损耗大，高频工作效率低。开关频率越高，开关损耗越大。实际开关过程中还存在电压过冲、振荡等现象，这会使开关损耗更大。此外，由于硬开关PWM控制逆变电源的开关管在关断过程中的电流、电压变化很快，其变化率 di/dt 、 du/dt 很大，所以产生的电磁干扰（EMI）比较严重，给电磁兼容性（EMC）设计带来一定的问题。在“硬开关”的开关过程中，电子功率器件的工作条件非常恶劣，是造成电子功率器件易于损坏的重要原因之一。

“软开关”是相对于“硬开关”而言的，表述的是逆变电源中的电子功率开关的开通与关断的行为状态与条件。“软开关”技术的实质是采用了谐振变流技术，即在逆变主电路中增加储能元件，产生谐振，迫使功率器件上的电压或电流迅速降为零，使功率开关器件在零电压或零电流状态下导通和关断。

软开关变换电路结构有多种形式。零电压开关（ZVS）、零电流开关（ZCS）、零电压零电流开关（ZVZCS）、变频控制和恒频控制等。

恒频移相控制方式，是软开关型逆变弧焊电源的主要发展方向之一，被大多数软开关逆变弧焊电源所采用，







7.8 逆变式交流方波弧焊电源简介

