

正弦波逆变器中的SPWM调制 方式简介

电源网2012年度技术交流大会

-----钟任生

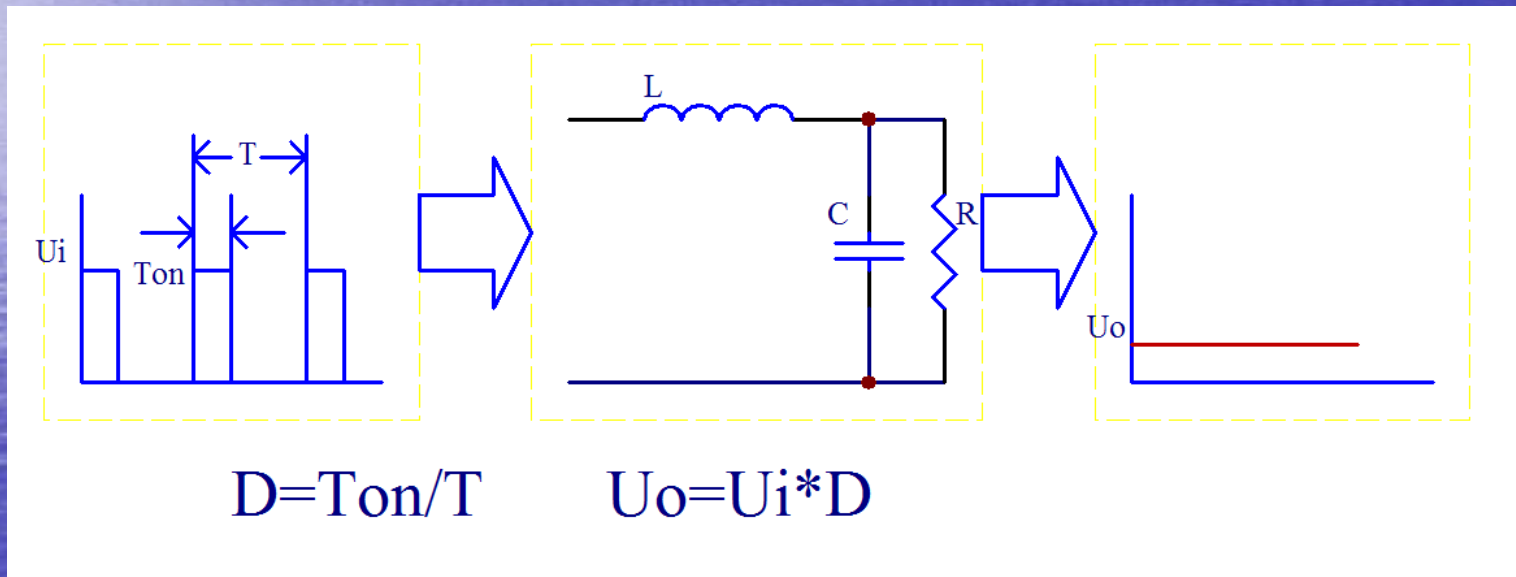
调制:

一般来说,使载波的某些特性(如幅度,频率或相位)随基波变化的过程我们称为调制。用调制的方式传输基波,我们一般都是为了便于提升传输的某些特性,如距离,抗干扰性,效率等.....

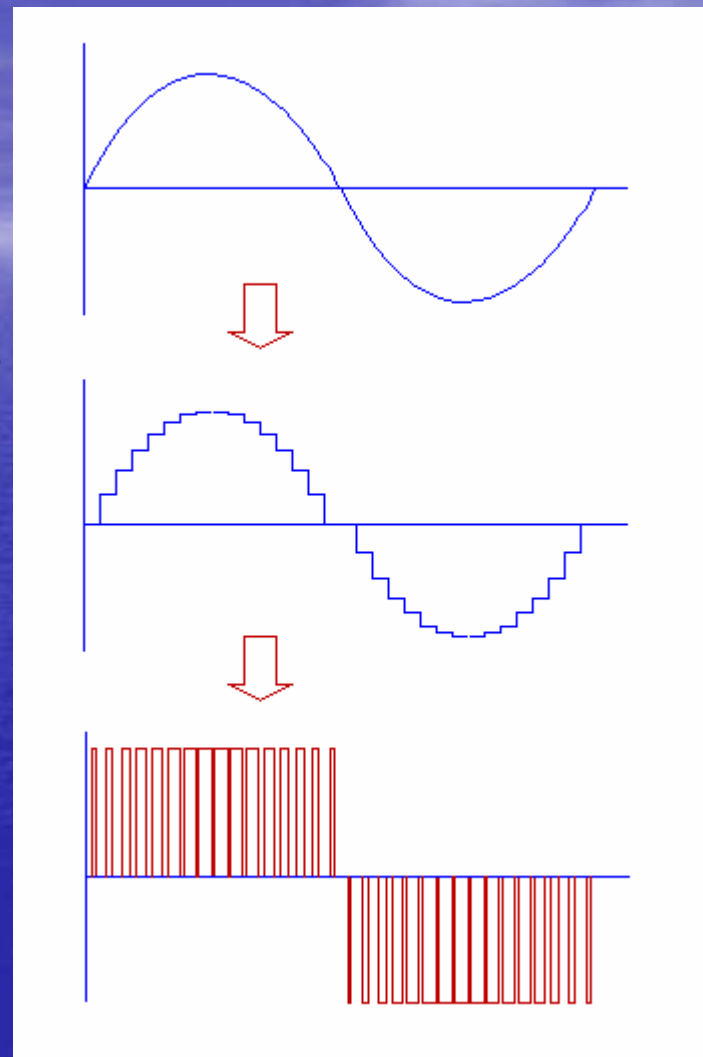
调制的种类:

调制的种类很多,分类方法也不一致,比如广播电视通讯中的调幅和调频,就是为了使高频正弦波载波的幅度和相位跟随基波(音视频信号)的频率和幅度的变化。达到远距离传输的目的。

这里，我们先来回顾一下PWM (Pulse Width Modulation，英文简称PWM) 调制方式,其基本原理如下图所示:



这就是在开关电源中我们常用的DC-DC变换的基本原理，在这个变换过程中实现了功率开关管工作在开关状态，理论效率为1.按照这个思路，如果对于交流电，如50HZ的正弦波，我们把它看成是有许许多多的呈阶梯状的直流信号组成的，这样我们就可以用许许多多的宽窄不等的脉冲来等效这个正弦波了，从而实现了功率管工作在开关状态。如果在一个正弦波周期内的脉冲个数比较多，就能精度比较高地通过LC滤波还原成正弦波，这就是SPWM调制的基本原理。



正弦脉宽调制（Sine Pulse Width Modulation，英文简称SPWM)也是一种调制方式，其基本内容为：

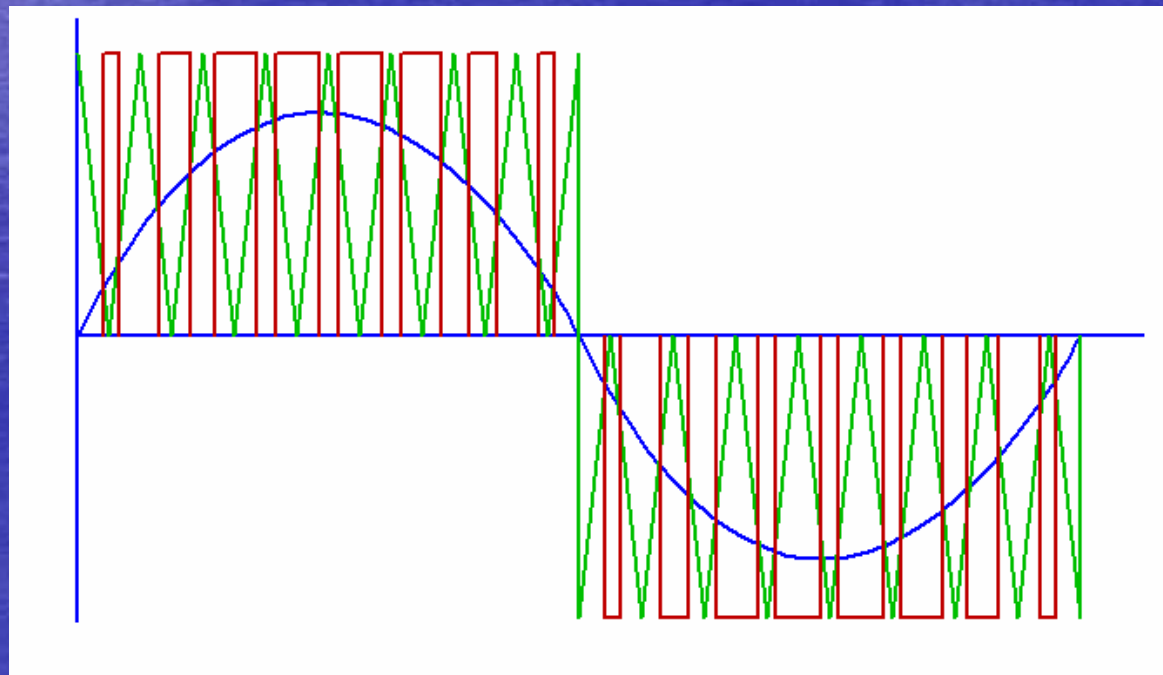
- 1.基波：一般为低频率（相对于载波）的正弦波，如逆变电源中的50/60/400Hz正弦波信号，D类功放中20-20kHz的音频信号等。
- 2.载波：一般为高频率（相对于基波）的线性三角波或锯齿波。
- 3.载波比：载波频率和基波频率的比值我们成为载波比。
- 4.LC滤波：主要是通过LC的滤波作用把一系列按正弦规律变化的脉冲还原成正弦波。
- 5.调制度M：在SPWM调制里，调制度等于基准正弦波（调制波）幅值和载波幅值的比值。M<1时直流母线的利用率低；M=1时，能输出最大不失真调制波；M>1时，输出调制波产生削顶和大量的谐波。

SPWM调制的实现方式:

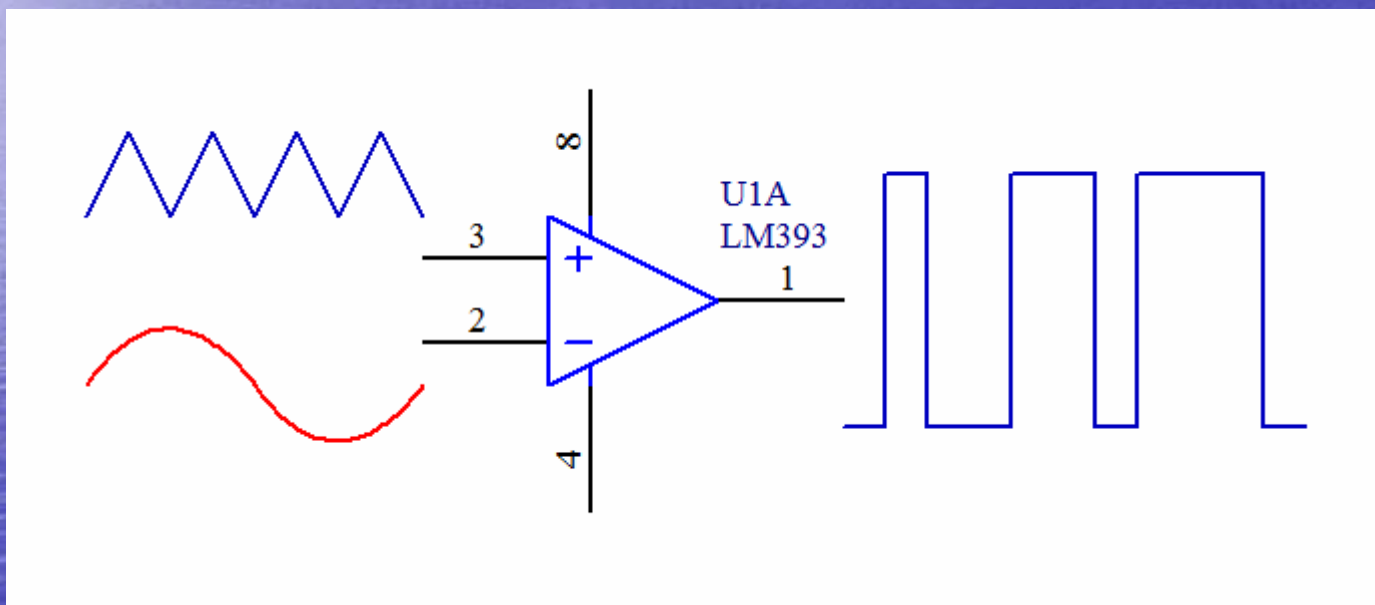
模拟实现方式:

在模拟电路里, 我们常常用调制基波 (正弦波) 和载波 (三角波或锯齿波) 的幅值来做比较, 幅值高时就输出高电平或低电平产生SPWM调制波。

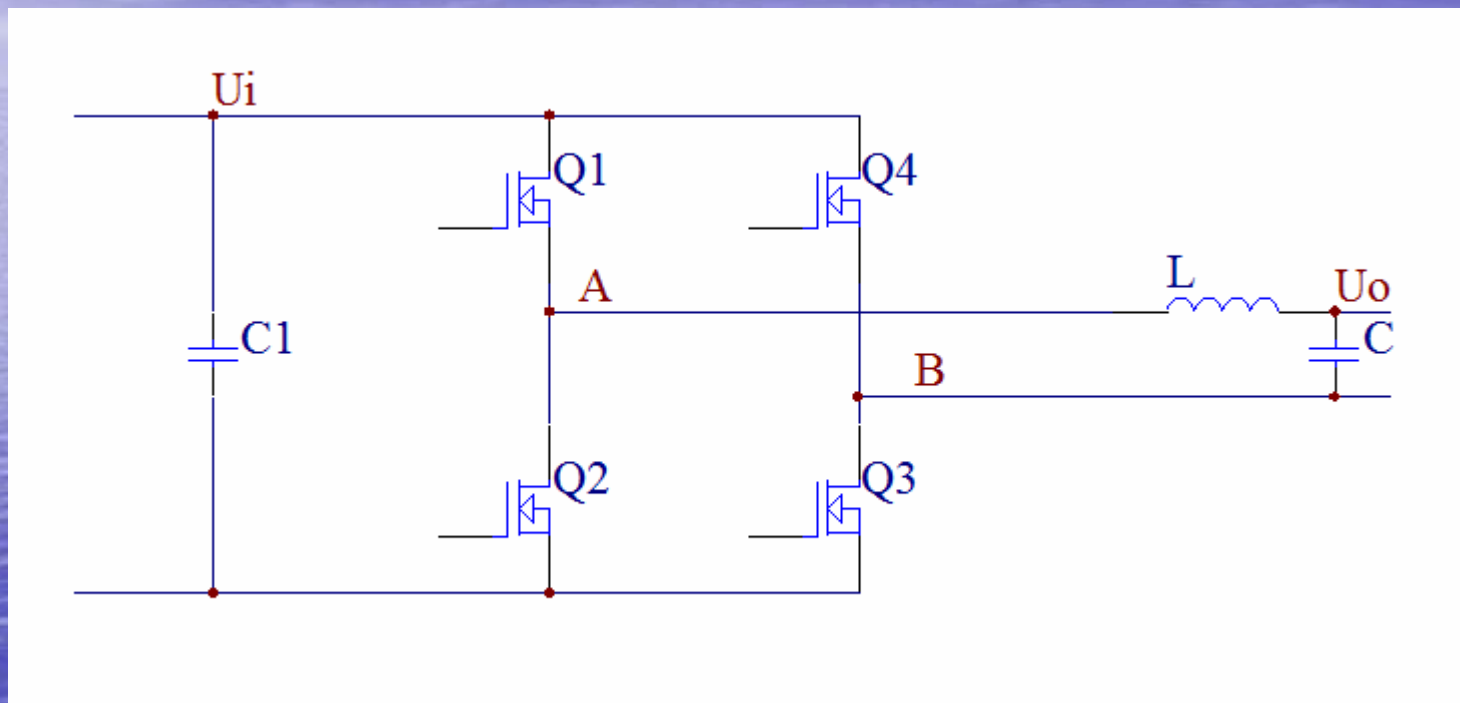
单极性调制: 其基本原理如下图所示



具体的实现方法就是把基波和载波分别输入到比较器的正负端，如下如所示：

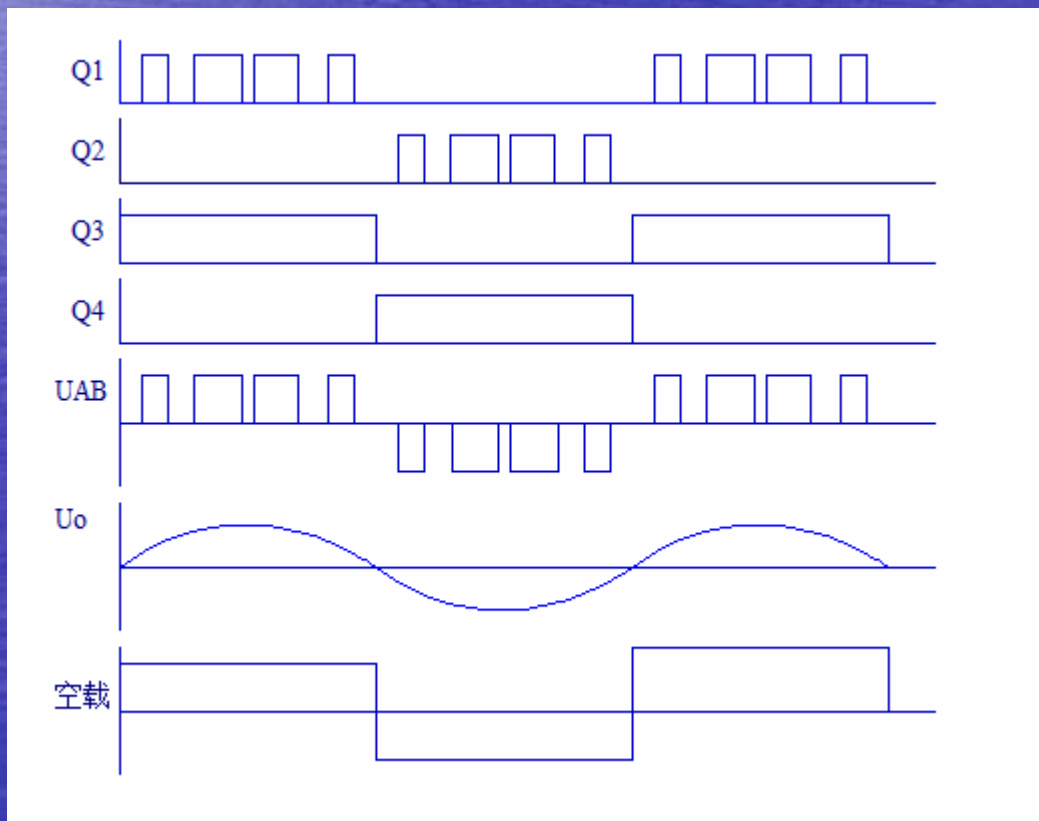


单极性SPWM在全桥电路中的驱动时序：
全桥的基本变换电路为：

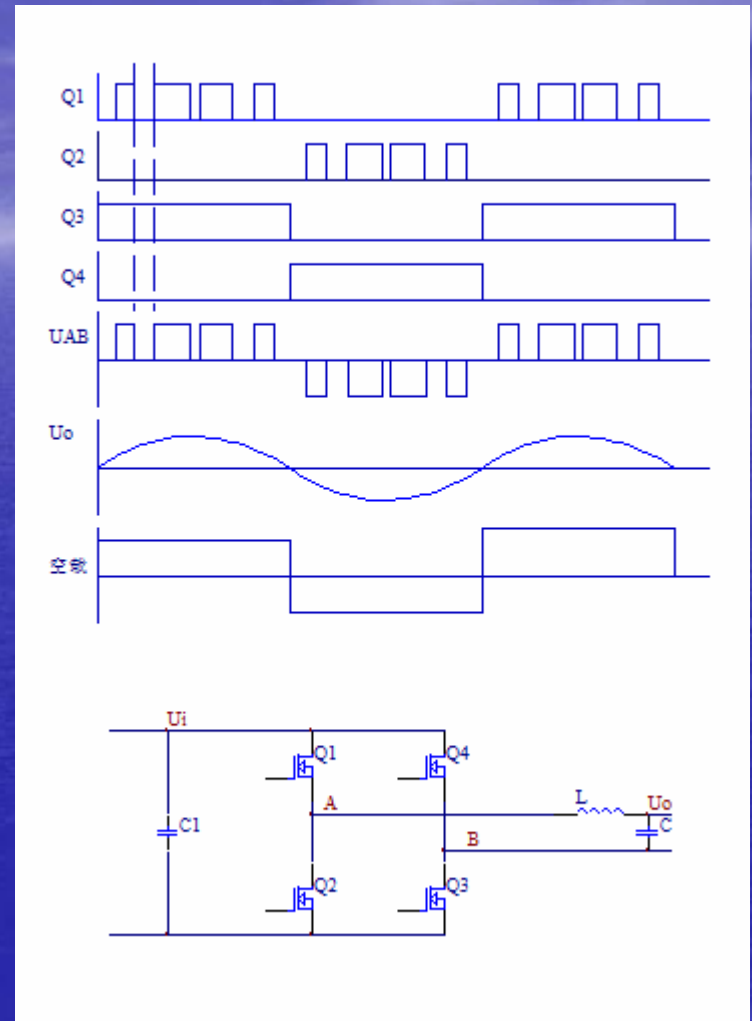


一种误区:

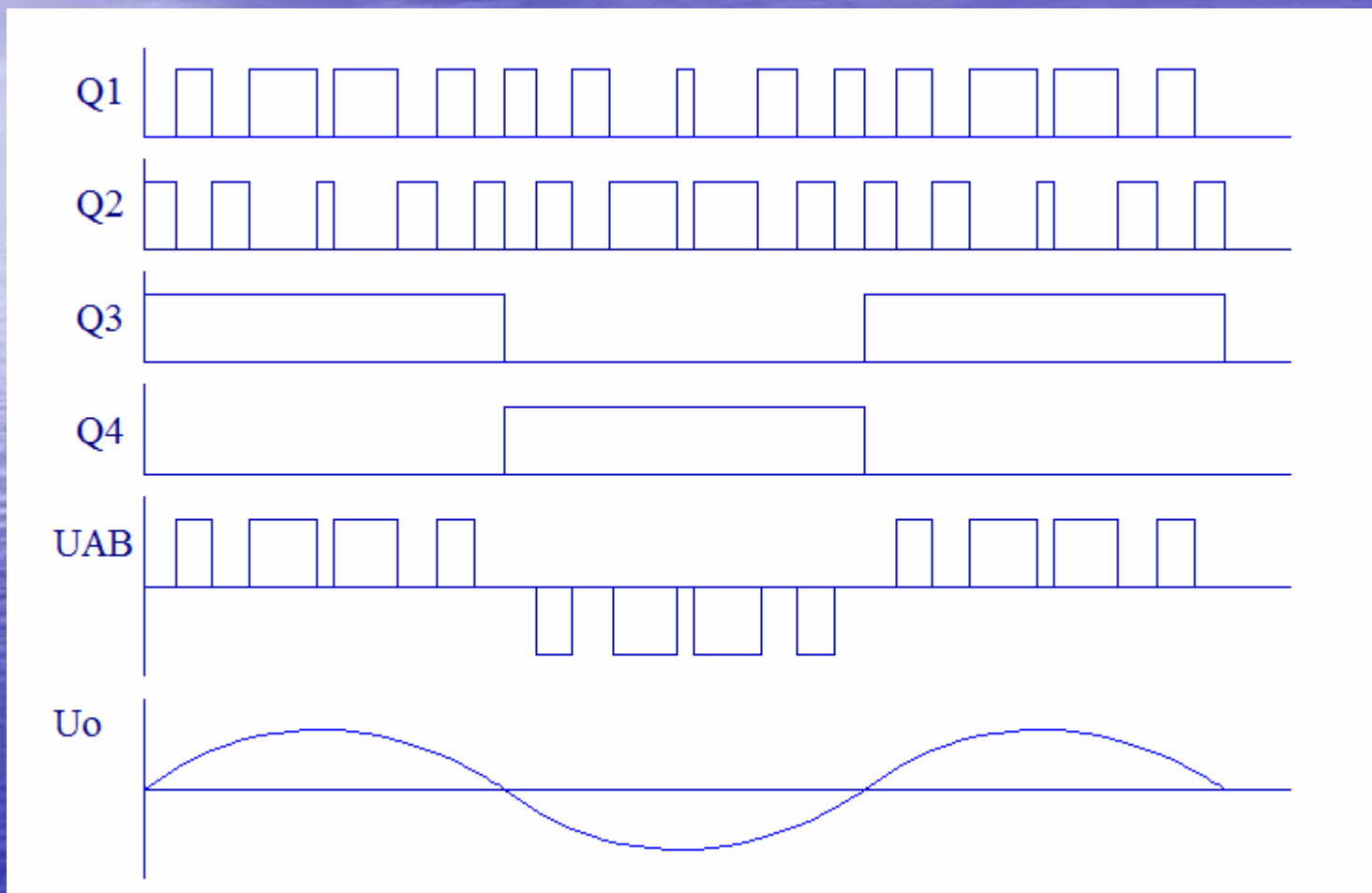
如果Q1-Q4的驱动时序如下图，我们可以分析出，当正弦波正半波时Q1,Q3按正弦规律导通，负半波时Q2,Q4按正弦规律导通.最终A，B两节点之间的波形如下图的UAB；经过LC滤波后的输出波形如下图的Uo所示为正弦波。可是实际我们搭电路出来一试呢，发现空载时Uo为50Hz方波，带载到一定程度才是正弦波，为什么呢？怎么改进呢？



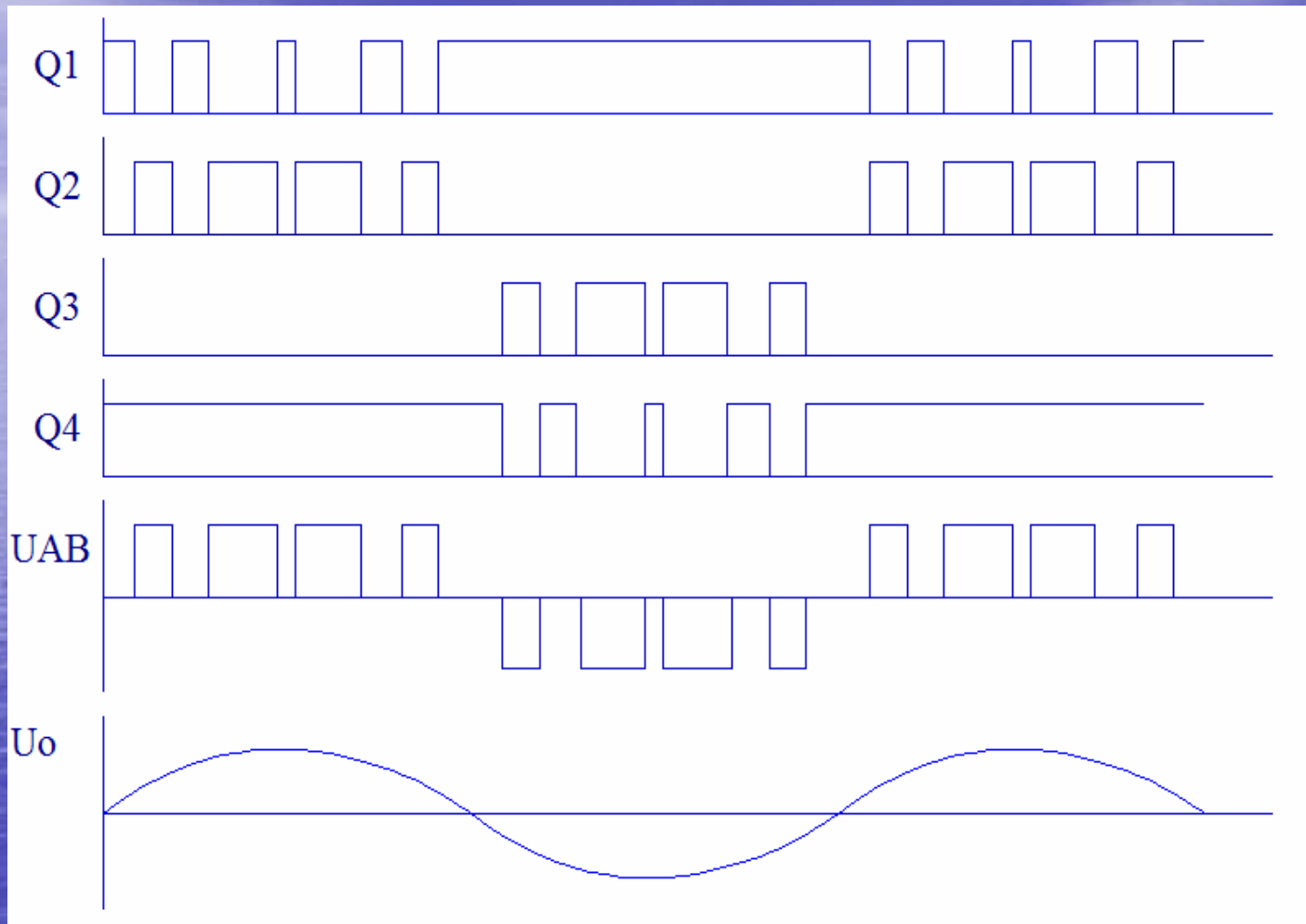
现在我们就来分析这个问题：
空载时，在Q1的第一个脉冲导通后，母线电压通过L给C充电，此时C充上的电压并不高，Q1的第一个脉冲过后，4个功率管中只有Q3导通，所以C上的电压得以保持到Q2的第二个脉冲的到来，这样C上的电压又在第二个脉冲充得更高，这样要不了几个脉冲，C上的电压就充到母线电压了，因而空载就输出方波了。要解决这个问题，只需要在Q1截止时让Q2导通，这样C在上一个脉冲储存的能量会有一部分返回到电感L,这样电感的电流才不会断续， U_o 就空载也输出正弦波了。



下面是典型的单极性调制正确的驱动时序：



从上面的驱动时序可以看出典型的单极性调制有如下特点：高频臂Q1,Q2两个功率管工作在高频状态，低频臂Q3,Q4两个功率管工作在低频状态，只有一半的功率管有开关损耗，和其他4个功率管都工作在高频状态的调制方式相比，总的开关损耗只有一半。由此可以知道，高频臂Q1,Q2两个功率管工作在高频状态，损耗比低频臂Q3,Q4两个功率管工作在低频状态要高，因而发热比较大，寿命要短。于是人们提出了一种改进型的单极性调制，其原理是让每个功率管都轮流半个基波周期工作在高频状态，半个周期工作在低频状态，其时序如下图：



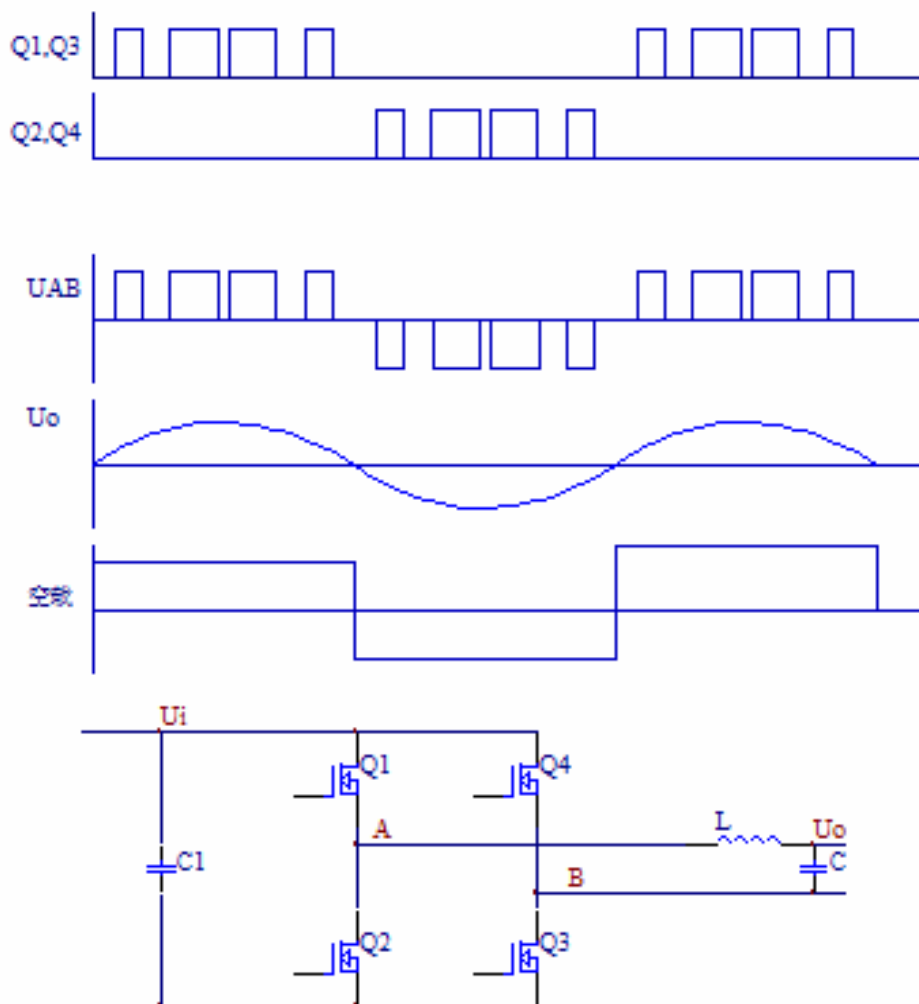
从上面得时序图可以看出，上面的4个功率管都是半个基波周期工作在高频状态，半个基波周期工作在低频状态，一直轮流工作了，这样4个功率管基本上做到了损耗均等，寿命均等。

另外说明一点的是，如果全桥电路是用自举驱动的话，上面时序图中的Q1,Q4改为放在两个桥臂的下管比较好，为什么呢，因为导通时间比较长，有利于自举电容的充电，可以减小自举电容。

可以说，上面典型的单极性调制和改进的单极性调制涵盖了市面上绝大多数的单相正弦波逆变器

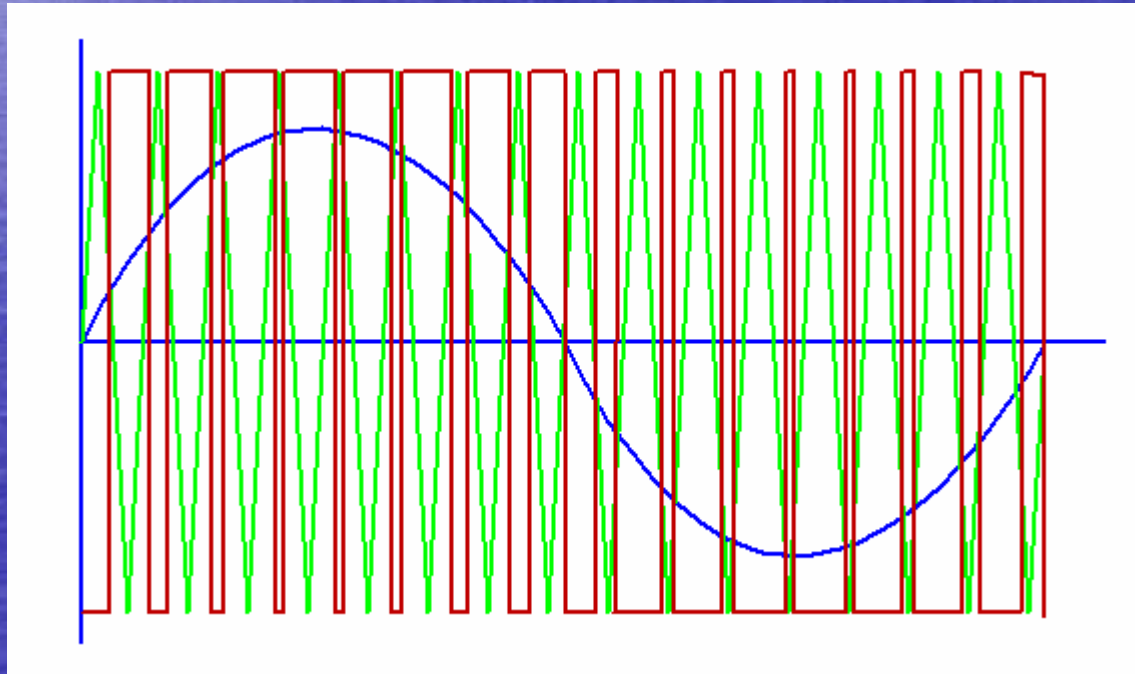
另外一种误区：

请看下面的的时序图,从原理上讲似乎也是说的通的,我们做全桥开关电源时就常常这样对角线驱动,缺点最多也就是由于变压器漏感的影响空载波形不那么好而已,而在这里也会导致空载输出方波,加载到一定程度才是正弦波。原理和前面讲的一样。

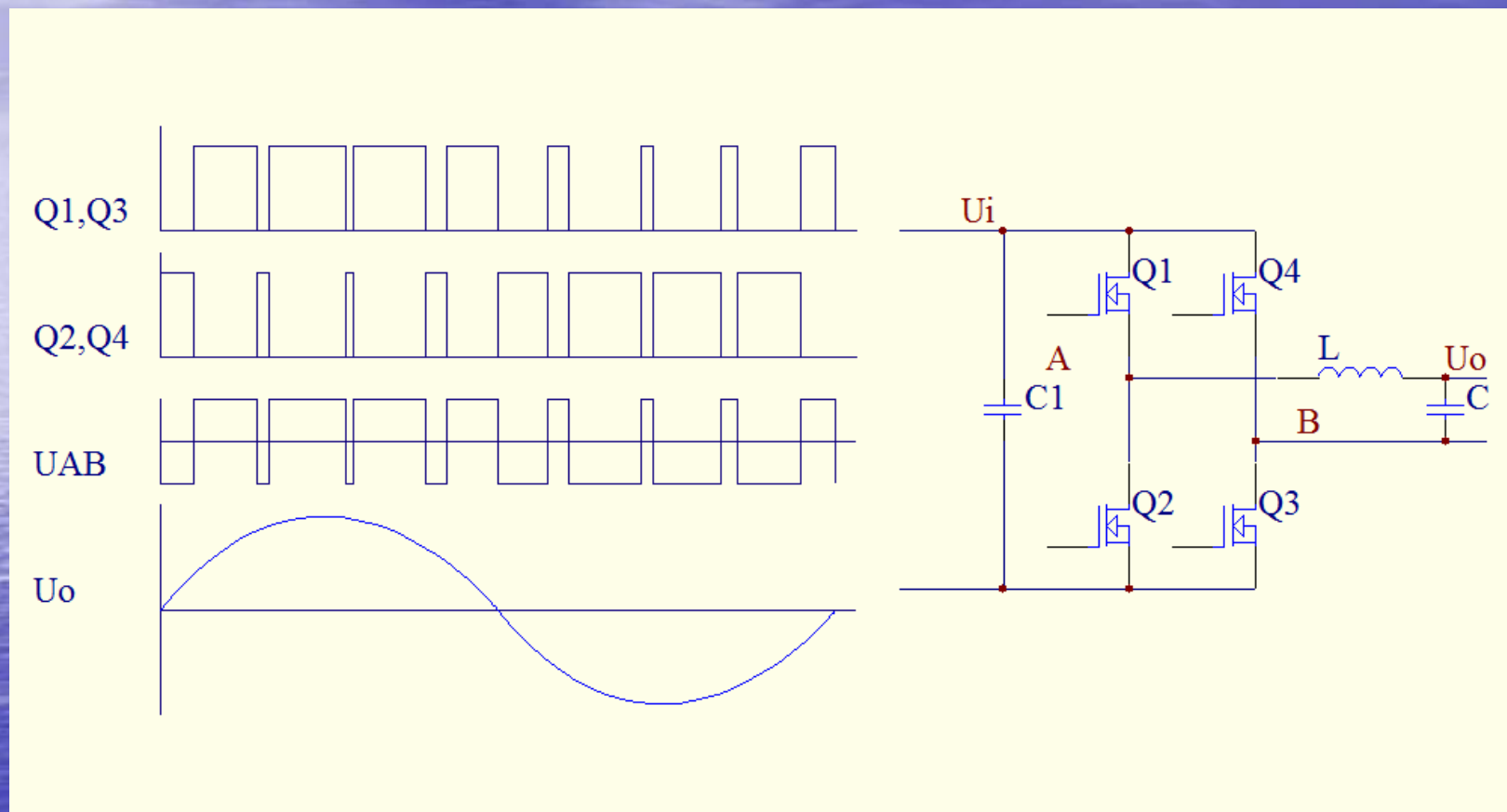


双极性调制：

下面是双极性调制的原理图，可以看出和单极性调制相比，每半个调制波基波周期都有高中低（或叫正负零）3电平。而单极性调制在基波的正半波只有高或0电平，在负半波只有0和负电平。



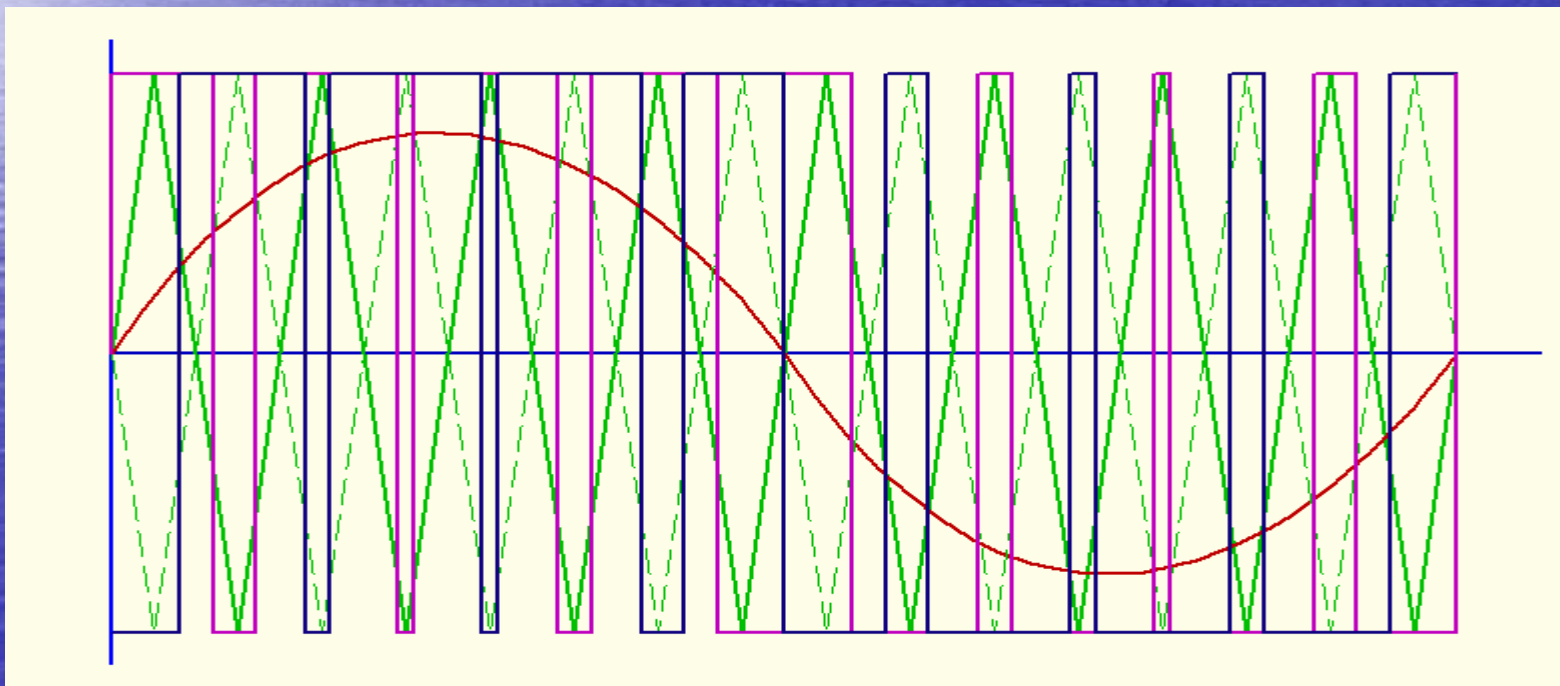
下面是全桥变换器中双极性SPWM调制的驱动波形：



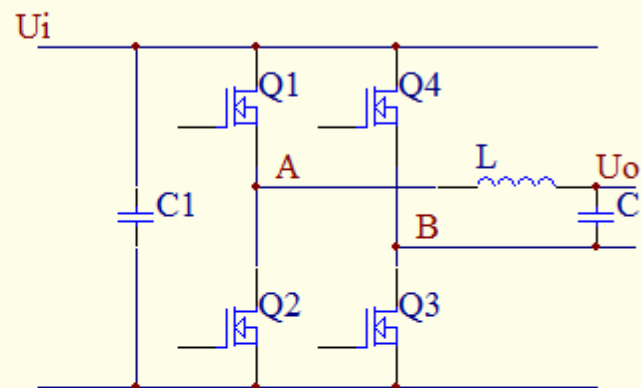
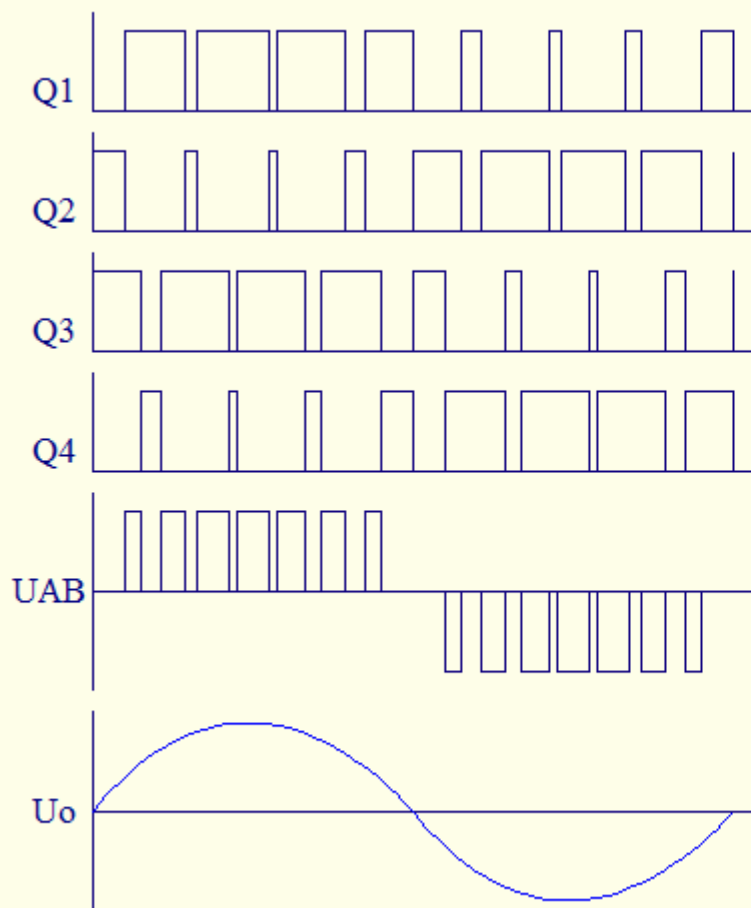
可以看出，双极性SPWM调制4个功率管都工作在高
频载波频率，因而开关损耗比较大。

单极性倍频调制：

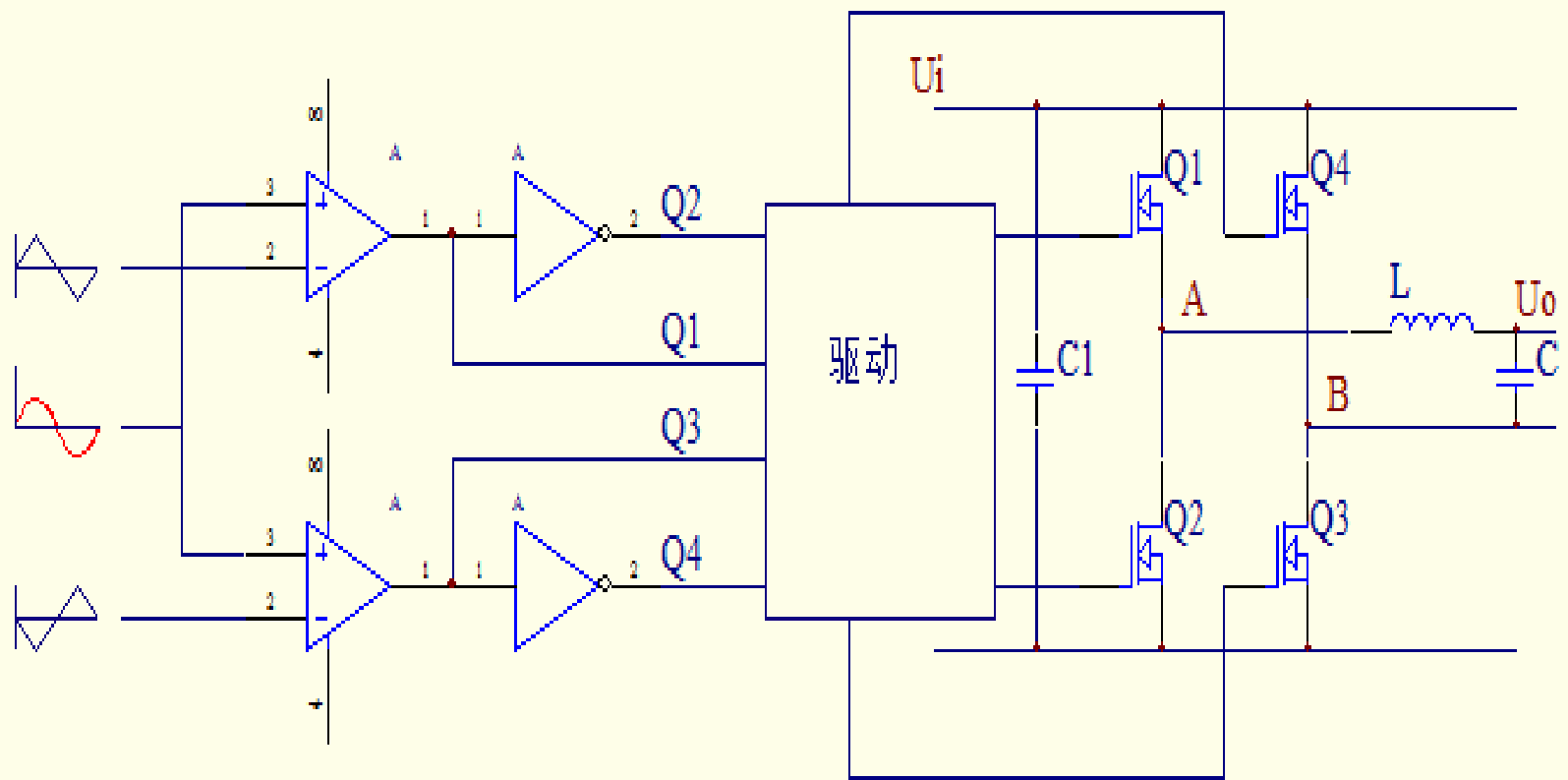
单极性倍频调制的原理和双极性调制有类似的地方，只是全桥输出在没有滤波之前的波形和功率管的工作频率变了。它采用了正弦波和两路互为反相的三角波相比较的方式，当然也可以是两路互为反相的正弦波和三角波相比较。其调制原理如下图：



全桥电路中各个功率管的驱动波形：

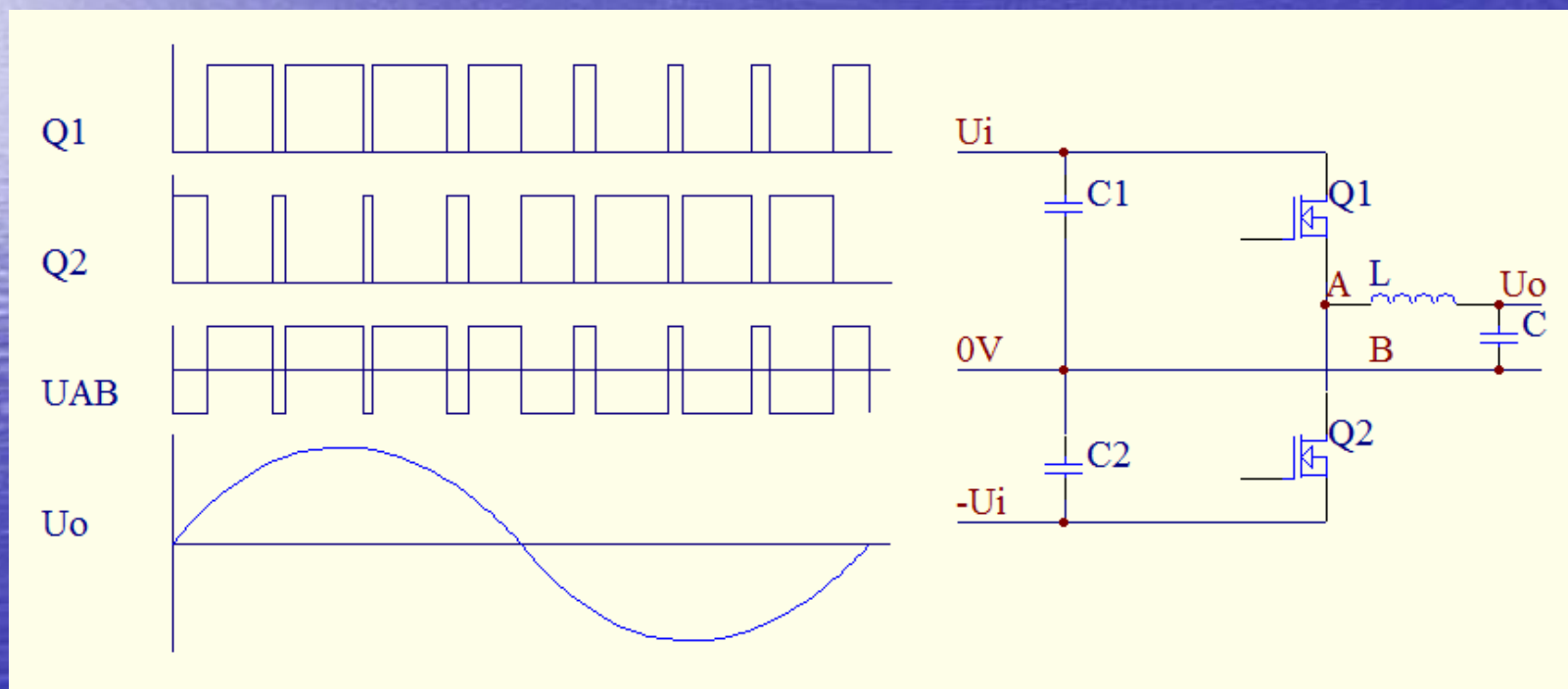


从UAB的波形可以看出，两路双极性调制经过全桥功率管的叠加之后最终的UAB波形变成了单极性，而且频率加倍，这就是这种调制方式称为单极性倍频调制的原因。这种调制方式波形完美，对各种负载的适应性好，因为倍频输出，LC的体积和成本可以比较小，缺点是4个功率管都工作在高频状态，因而开关损耗比较大。这种调制方式用模拟电路实现起来比较方便，所以也是D类功放的首选电路。用模拟电路实现的方法很多，其中一种方法是先用2个比较器，正弦波基波信号分别输入到2个比较器的正端，两路互为反相的三角波载波分别输入到2个比较器的负端。比较器输出的两路信号分别用非门反相得到2路反相信号，再加上原来的比较器输出的两路信号一共4路信号分别驱动全桥电路的4个功率管就可以了。具体原理图如下：



半桥变换器中SPWM驱动控制

前面讲的都是全桥变换器中SPWM驱动控制，有时候我们也会采用半桥变换器，半桥变换器中，双极性SPWM驱动控制实现起来比较简单，下面是其功率管驱动波形和基本电路，可以看出只要双极性SPWM后再倒相变成2路就可以了。

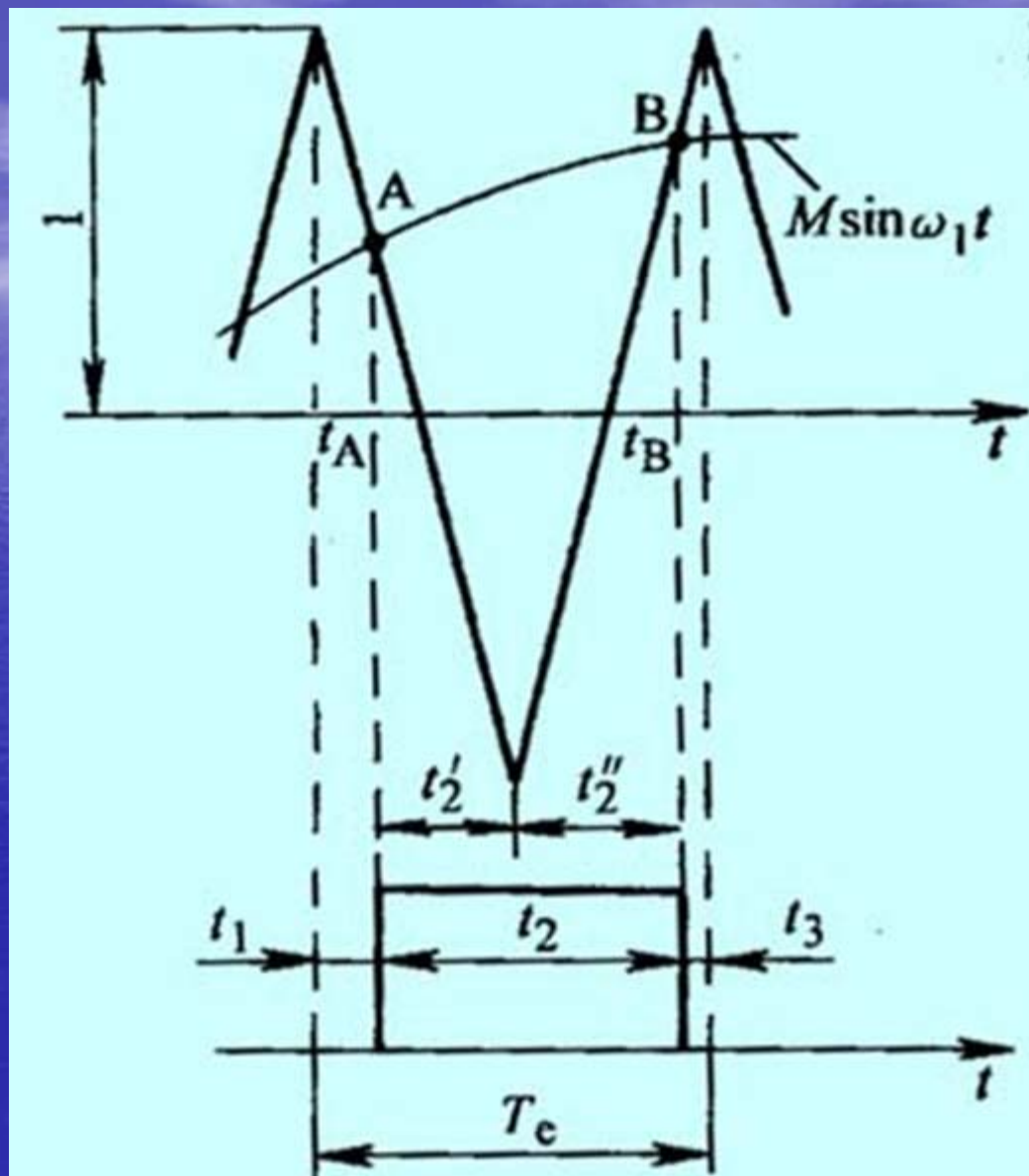


数字化SPWM控制方式

前面讲述了模拟产生SPWM的几种基本方式，它有利于加强我们对SPWM调制原理的理解。然而随着科技的发展，特别是各种微处理器(MCU和DSP)的普及，使得SPWM数字化控制方式得以实现和普及。SPWM控制方式的一个显著特点就是能直接输出SPWM波，关于基波（正弦波）和载波（三角波）只作为一个中间过程存在于程序的计算中。下面介绍软件产生SPWM波的几种常用的算法：

自然采样法:

完全按照前面讲的模拟控制的方法, 计算正弦基波和三角波载波的交点时刻, 从而求出相邻两个交点之间的脉宽或间歇时间, 我们称为自然采样法(natural sampling): 其基本原理如右图所示



在图中截取了任意一段正弦调制波与三角载波的相交情况。交点A是发出脉冲的时刻 t_A ，B点是结束脉冲的时刻 t_B 。 t_c 为三角载波的周期； t_1 为在 t_c 时间段内脉冲发生以前(即A点以前)的间歇时间； t_2 为A,B之间的脉宽时间； t_3 为在 t_c 时间段以内B点以后的间歇时间。显然， $t_c = t_1 + t_2 + t_3$ 。

若以单位1代表三角载波的幅值 U_{tm} ，则正弦调制波的幅值 U_{rm} 就表示调制度 m ，正弦调制波可写作 $U_r = m \sin \omega_1 t$ 式中， ω_1 是调制频率。由于A、A两点对三角载波的中心线并不对称，须把脉宽时间 t_2 分成 t'_2 和 t''_2 两部分(见上页图)。按相似直角三角形的几何关系，可知

$$\frac{2}{T_c/2} = \frac{1 + M \sin \omega_1 t_A}{t_2'}$$

$$\frac{2}{T_c/2} = \frac{1 + M \sin \omega_1 t_B}{t_2''}$$

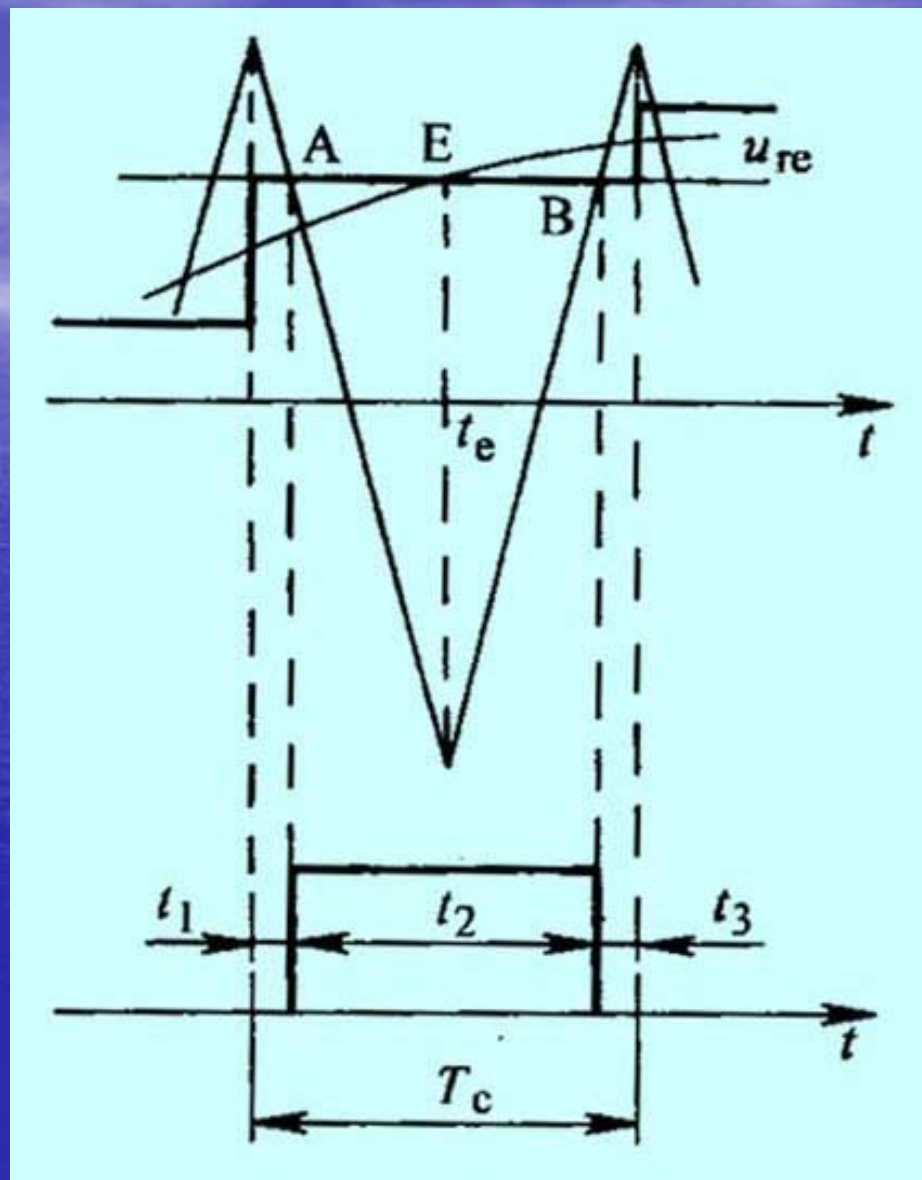
经整理后得

$$t_2 = t_2' + t_2'' = \frac{T_c}{2} \left[1 + \frac{M}{2} (\sin \omega_1 t_A + \sin \omega_1 t_B) \right]$$

这是一个超越方程，其中 t_A 、 t_B 与载波比 n 、调制度 m 都有关系，求解困难，而且 $t_1 \neq t_3$ ，分别计算更增加了困难。因此，自然采样法虽能确切反映正弦脉宽调制的原始方法，计算结果准确，却不适于普通单片机微机实时控制。不过随着高速处理器（DSC和DSP）的发展，自然采样法的实现也成为了可能。

规则采样法：

前面讲到低速单片机时代自然采样法并不适合微机计算。自然采样法的关键问题是，spwm波形每一个脉冲的起始和终止时刻 t_A 和 t_B 对三角波的中心线不对称，因而求解困难。工程上实用的方法要求算法简单，只要误差不大，允许作一些近似处理。这样就提出了规则采样法(regular sampling)。规则采样法又分为许多种，这里介绍最常见的一种对称规则采样法。其原理如右图：



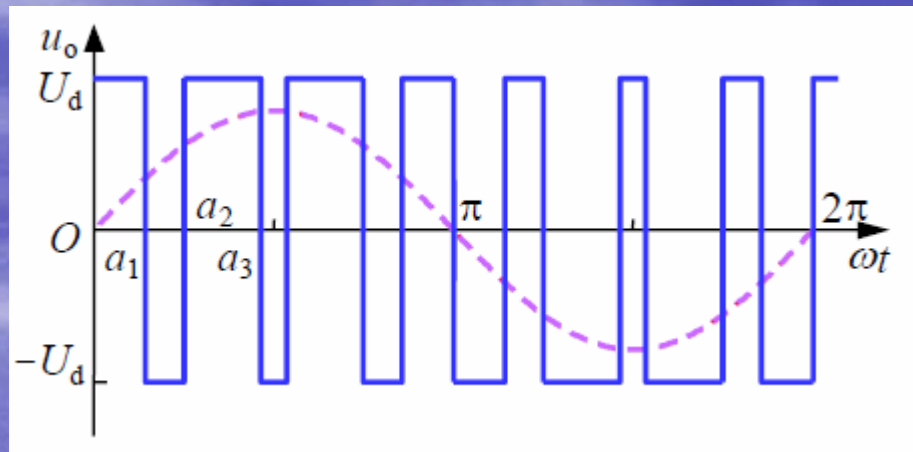
在规则采样法中，三角载波每个周期的采样时刻都是确定的，都在负峰值处，不必作图就可计算出相应时刻的正弦波值。例如采样值应依次为 $m\sin \omega_1 t_e$ ， $m\sin(\omega_1 t_e + t_c)$ ， $m\sin(\omega_1 t_e + 2t_c)$ ，.....，因而脉宽时间和间歇时间都可以很容易计算出来。由上页图可得规则采样法的计算公式：
脉宽时间：

$$t_1 = t_3 = \frac{1}{2}(T_c - t_2)$$

间歇时间：

$$t_2 = \frac{T_c}{2}(1 + M \sin \omega_1 t_e)$$

谐波消去法：
如右图所示：



输出电压半周期内，器件通、断各3次（不包括0和 π ），共6个开关时刻可控。为减少谐波并简化控制，要尽量使波形对称；

首先，为消除偶次谐波，使波形正负两半周期镜像对称，即 $u(\omega t) = -u(\omega t + \pi)$

其次，为消除谐波中余弦项，应使波形在正半周期内前后1/4周期以 $\pi/2$ 为轴线对称；

$$u(\omega t) = u(\pi - \omega t)$$

同时满足上两式的波形称为四分之一周期对称波形，用傅里叶级数表示为：

$$u(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} a_n \sin n\omega t$$

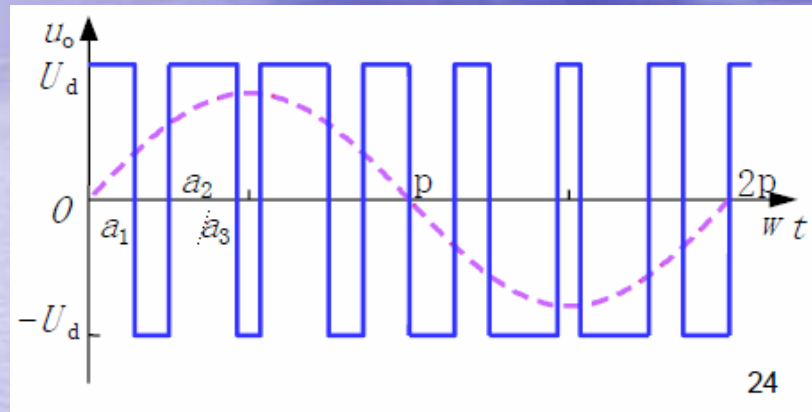
式中, a_n 为 $a_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\omega t) \sin n\omega t d\omega t$

能独立控制 a_1 、 a_2 和 a_3 共3个时刻。该波形的 a_n 为

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{4}{\pi} \left[\int_0^{\alpha_1} \frac{U_d}{2} \sin n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left(-\frac{U_d}{2} \sin n\omega t\right) d\omega t \right. \\ &\quad \left. + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} \frac{U_d}{2} \sin n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_3}^{\frac{\pi}{2}} \left(-\frac{U_d}{2} \sin n\omega t\right) d\omega t \right] \\ &= \frac{2U_d}{n\pi} (1 - 2 \cos n\alpha_1 + 2 \cos n\alpha_2 - 2 \cos n\alpha_3) \end{aligned}$$

式中 $n=1,3,5,\dots$

确定 a_1 的值，再令两个不同的 $a_n=0$ ($n= 1, 3, 5 \dots$)，就可建立三个方程，求得 a_1 、 a_2 和 a_3 ：



消去两种特定频率的谐波

在三相对称电路的线电压中，相电压所含的3次谐波相互抵消。可考虑消去5次和7次谐波，得如下联立方程：

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{2U_d}{\pi} (1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 - 2 \cos \alpha_3) \\ a_5 &= \frac{2U_d}{5\pi} (1 - 2 \cos 5\alpha_1 + 2 \cos 5\alpha_2 - 2 \cos 5\alpha_3) = 0 \\ a_7 &= \frac{2U_d}{7\pi} (1 - 2 \cos 7\alpha_1 + 2 \cos 7\alpha_2 - 2 \cos 7\alpha_3) = 0 \end{aligned} \right\}$$

给定 a_1 ，解方程可得 a_1 、 a_2 和 a_3 。 a_1 变， a_1 、 a_2 和 a_3 也相应改变。

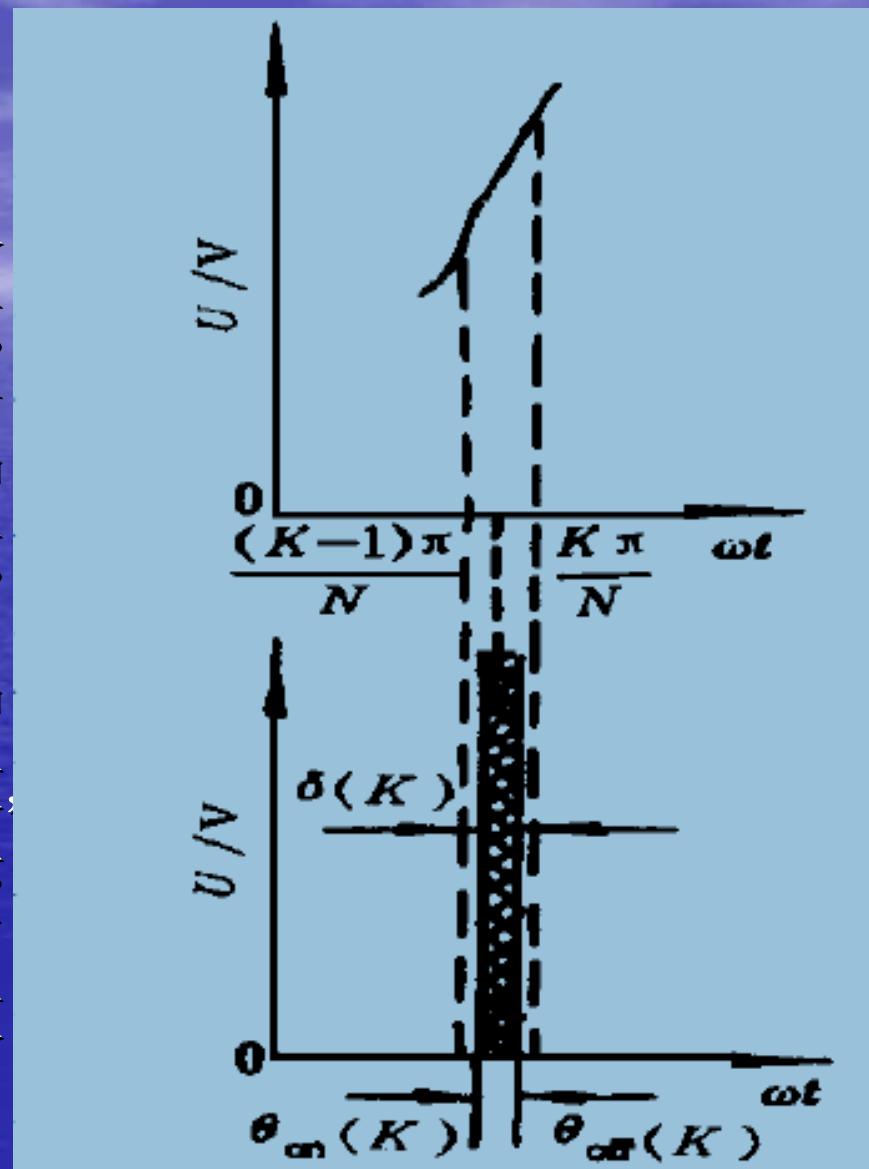
一般在输出电压半周期内，器件通、断各 k 次，考虑到PWM波四分之一周期对称， k 个开关时刻可控，除用一个自由度控制基波幅值外，可消去 $k-1$ 个频率的特定谐波。

k 的取值越大，开关时刻的计算越复杂。

等面积法：

单极性等面积算法

如图1 所示，把一个正弦半波分为 N 等份，然后每一等份的正弦曲线与横轴所包围的面积都用一个与此面积相等的等高矩形脉冲来代替。矩形脉冲的中点与正弦波每一等份的中点重合，这样，由 N 个等幅而不等宽的矩形脉冲所构成的波形就与正弦半波等效。正弦波的负半周也可用同样方法来效。显然这一系列脉冲波形的宽度或开关时刻可以严格地用数学方法计算得到。



将正弦信号的正半周分为 N 等份, 则每份为 π/N 弧度, 脉冲高度为 $U_s/2$, U_s 为直流母线电压, 设第 K 个脉冲宽度为 $\delta(K)$, 则第 K 份正弦波面积与对应的第 K 个 SPWM 脉冲面积相等, 得

$$\delta(K) = \frac{2U_m}{U_s} \left(\cos \left(\frac{K-1}{N} \pi \right) - \cos \left(\frac{K}{N} \pi \right) \right) \quad (1)$$

其中, U_m 为正弦调制波幅值。

$$\theta_{on}(K) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(2K-1)}{N} \pi - \delta(K) \right\} \quad (2)$$

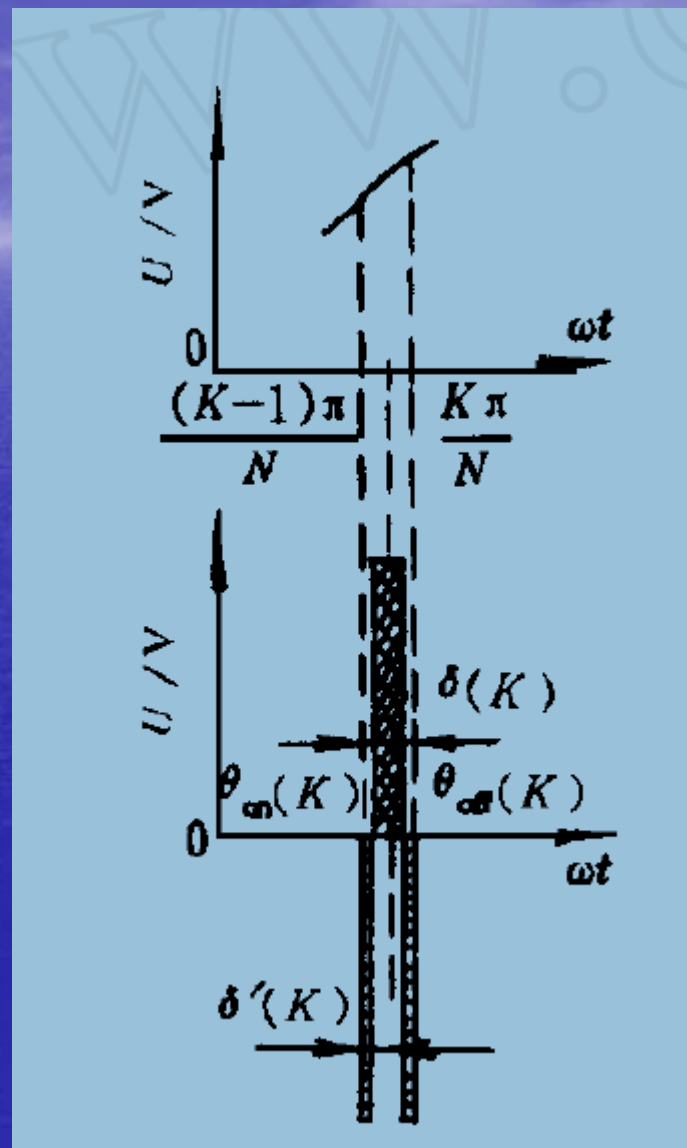
$$\theta_{off}(K) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(2K-1)}{N} \pi + \delta(K) \right\} \quad (3)$$

其中, $\theta_{on}(K)$ 为第 K 个脉冲开通角, $\theta_{off}(K)$ 为第 K 个脉冲关断角。

双极式等面积算法

在双极式等面积算法中, 逆变器主电路中每个桥臂的两个开关器件交替通断, 处于互补工作方式, 如右图所示。同单极性等面积算法一样, 将正弦信号半周期分为 N 等份, 其第 K 等份面积与所对应的SPWM 脉冲面积相等, 得

$$\delta(K) - 2\delta'(K) = \frac{2U_m}{U_s} \left[\cos\left(\frac{K-1}{N}\pi\right) - \cos\left(\frac{K}{N}\pi\right) \right] \quad (4)$$



又

$$\delta(K) + 2\delta'(K) = \frac{\pi}{N} \quad (5)$$

解(4)、(5) 得

$$\delta(K) = \frac{\pi}{2N} + \frac{U_m}{U_s} \left[\cos \left(\frac{K-1}{N} \pi \right) - \cos \left(\frac{K}{N} \pi \right) \right] \quad (6)$$
$$\delta'(K) = \frac{\pi}{4N} + \frac{U_m}{2U_s} \left[\cos \left(\frac{K-1}{N} \pi \right) - \cos \left(\frac{K}{N} \pi \right) \right] \quad (7)$$

则第 K 个脉冲开关角为

$$\theta_n(K) = \frac{K-1}{N} \pi + \delta'(K) \quad (8)$$

$$\theta_{ff}(K) = \frac{K}{N} \pi - \delta'(K) \quad (9)$$

其中, $\theta_{on}(K)$ 为第 K 个SPWM 脉冲上管开通角,
 $\theta_{off}(K)$ 为第 K 个 SPWM 脉冲上管关断角, $\delta'(K - 1) + \delta'(K)$ 为第 $K - 1$ 个SPWM 脉冲下管开通脉宽。

用等面法计算正弦波数据表

对于一般的单片机, 采用查表法是最常见的, 正弦波数据表的计算采用等面积法是最准确的, 特别是在采样次数不高时。比如在四分之一一个正弦波周期采用16级脉宽, 每级重复5次, 载波频率为 $50 * 16 * 4 * 5 = 16K$. 这样, 我们只要把四分之一一个正弦波周期分成16个等分, 每个等分相当 $90/16 = 5.625$ 度, 分别用一个0-255的数值表示其宽度就可以了。正弦波数据表的计算常用Excel表格计算, 下面以单极性为例, 用Excel举例计算一个64级精度正弦波数据表。

先分析前面讲到的公式：

$$\delta(K) = \frac{2U_m}{U_s} \left(\cos \left(\frac{K-1}{N} \pi \right) - \cos \left(\frac{K}{N} \pi \right) \right) \quad (1)$$

对于公式里的K,我们分别取1-64就可以了，对于公式里的 $\frac{2U_m}{U_s}$ 部分，我们只为了计算一个标准的正弦数据表，完全可以看成一个合适的常数，对于8位精度的SPWM,只要计算结果是数据表中的最大数接近又小于256就可以了。下面的例子中这个常数直接取10000.计算结果是:3,9,15,21,27,33,39,45,51,57,63,68,74,80,86,91,97,102,108,113,118,124,129,134,139,144,149,153,158,163,167,171,176,180,184,188,192,195,199,202,206,209,212,215,218,221,223,226,228,230,232,234,236,237,240,241,242,243,245,245,245,245.

Excel表截图为：

M58	f _k							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1				等值		D1-D64		
2				0	0	1		
3	a1	1	1.40625	0.024543672	0.999698819	0.000301181	3	
4	a2	2	2.8125	0.049087344	0.998795458	0.000903361	9	
5	a3	3	4.21875	0.073631016	0.997290461	0.001504997	15	
6	a4	4	5.625	0.098174688	0.995184735	0.002105726	21	
7	a5	5	7.03125	0.122718359	0.992479547	0.002705188	27	
8	a6	6	8.4375	0.147262031	0.989176528	0.003303019	33	
9	a7	7	9.84375	0.171805703	0.985277667	0.003898861	39	
10	a8	8	11.25	0.196349375	0.980785313	0.004492354	45	
11	a9	9	12.65625	0.220893047	0.975702171	0.005083142	51	
12	a10	10	14.0625	0.245436719	0.970031304	0.005670867	57	
13	a11	11	15.46875	0.269980391	0.963776127	0.006255177	63	
14	a12	12	16.875	0.294524063	0.956940408	0.006835719	68	
15	a13	13	18.28125	0.319067734	0.949528265	0.007412143	74	
16	a14	14	19.6875	0.343611406	0.941544163	0.007984102	80	
17	a15	15	21.09375	0.368155078	0.932992911	0.008551252	86	
18	a16	16	22.5	0.39269875	0.923879659	0.009113251	91	
19	a17	17	23.90625	0.417242422	0.914209899	0.009669761	97	
20	a18	18	25.3125	0.441786094	0.903989453	0.010220446	102	
21	a19	19	26.71875	0.466329766	0.893224478	0.010764974	108	
22	a20	20	28.125	0.490873438	0.88192146	0.011303018	113	
23	a21	21	29.53125	0.515417109	0.870087206	0.011834254	118	
24	a22	22	30.9375	0.539960781	0.857728844	0.012358361	124	
25	a23	23	32.34375	0.564504453	0.84485382	0.012875024	129	
26	a24	24	33.75	0.589048125	0.831469889	0.013383932	134	
27	a25	25	35.15625	0.613591797	0.817585112	0.013884777	139	
28	a26	26	36.5625	0.638135469	0.803207853	0.014377259	144	
29	a27	27	37.96875	0.662679141	0.788346772	0.014861081	149	
30	a28	28	39.375	0.687222813	0.773010822	0.01533595	153	

31	a29	29	40.78125	0.711766484	0.757209239	0.015801582	158
32	a30	30	42.1875	0.736310156	0.740951543	0.016257696	163
33	a31	31	43.59375	0.760853828	0.724247526	0.016704017	167
34	a32	32	45	0.7853975	0.70710725	0.017140276	171
35	a33	33	46.40625	0.809941172	0.68954104	0.01756621	176
36	a34	34	47.8125	0.834484844	0.671559477	0.017981563	180
37	a35	35	49.21875	0.859028516	0.653173392	0.018386085	184
38	a36	36	50.625	0.883572188	0.634393861	0.018779531	188
39	a37	37	52.03125	0.908115859	0.615232195	0.019161666	192
40	a38	38	53.4375	0.932659531	0.595699937	0.019532258	195
41	a39	39	54.84375	0.957203203	0.575808852	0.019891085	199
42	a40	40	56.25	0.981746875	0.555570923	0.02023793	202
43	a41	41	57.65625	1.006290547	0.534998338	0.020572585	206
44	a42	42	59.0625	1.030834219	0.514103491	0.020894847	209
45	a43	43	60.46875	1.055377891	0.492898968	0.021204523	212
46	a44	44	61.875	1.079921563	0.471397541	0.021501427	215
47	a45	45	63.28125	1.104465234	0.449612163	0.021785378	218
48	a46	46	64.6875	1.129008906	0.427555956	0.022056207	221
49	a47	47	66.09375	1.153552578	0.405242205	0.022313751	223
50	a48	48	67.5	1.17809625	0.382684352	0.022557853	226
51	a49	49	68.90625	1.202639922	0.359895984	0.022788367	228
52	a50	50	70.3125	1.227183594	0.336890829	0.023005155	230
53	a51	51	71.71875	1.251727266	0.313682744	0.023208085	232
54	a52	52	73.125	1.276270938	0.290285709	0.023397035	234
55	a53	53	74.53125	1.300814609	0.266713816	0.023571892	236
56	a54	54	75.9375	1.325358281	0.242981266	0.023732551	237
57	a55	55	77.34375	1.349901953	0.219102353	0.023878913	239
58	a56	56	78.75	1.374445625	0.195091461	0.024010892	240
59	a57	57	80.15625	1.398989297	0.170963053	0.024128408	241
60	a58	58	81.5625	1.423532969	0.146731664	0.024231389	242

61	a59	59	82.96875	1.448076641	0.122411889	0.024319775	243
62	a60	60	84.375	1.472620313	0.098018378	0.024393511	244
63	a61	61	85.78125	1.497163984	0.073565825	0.024452553	245
64	a62	62	87.1875	1.521707656	0.049068958	0.024496867	245
65	a63	63	88.59375	1.546251328	0.024542534	0.024526424	245
66	a64	64	90	1.570795	0.0000013268	0.024541207	245

今天要讲的内容就讲到这儿，谢谢大家！

The end
Thanks!

由于本人水平有限，不当之处在所难免，欢迎大家指正！

