

专业: 微电子科学与工程
姓名: Misaka3125
学号: _____
日期: 2025 年 12 月 23 日
地点: 紫金港东四 216

浙江大学 实验报告

课程名称: 电子电路设计实验 I 指导老师: 施红军、叶险峰、邓靖婧 成绩: _____
实验名称: 集成运算放大器应用电路研究 II 实验类型: 验证与设计 同组学生姓名: ZJU

一、实验目的

- 学习和研究由集成运放构成的积分器、比较器、波形发生器等应用电路的组成与原理，掌握其设计方法。
- 观察积分运算电路在实际应用时存在的积分漂移、积分误差等现象，了解解决方法。

二、实验理论基础

1. 反相积分器

反相积分器利用电容的充放电特性实现积分运算。

- 基本原理: 输出电压 $V_o(t)$ 与输入电压 $V_i(t)$ 的关系为:

$$V_o(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{V_i(t)}{R_1} dt = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t V_i(t) dt \quad (1)$$

当输入信号为一阶跃信号时, 即:

$$V_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ E, & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

输出电压为:

$$V_o(t) = -\frac{E}{R_1 C} t \quad (3)$$

- 积分漂移及误差:

- **积分漂移：**输入信号的直流分量、运放的输入失调电压等都会被积分，形成积分漂移，导致输出电压最终饱和。
- **漂移抑制：**实际使用时，常在积分电容两端并联一个电阻 R_f （如图 2），形成直流负反馈，用以限制电路的直流电压增益。
- **积分误差：** R_f 的接入会对积分电容产生分流作用，从而导致积分误差。
- **设计条件：**为了减小积分误差，一般要求 $R_f \gg \frac{1}{j\omega C}$ ，即信号频率 $f \gg \frac{1}{2\pi R_f C}$ ，此时 R_f 可认为开路（近似理想积分器）。
- **参数选择：**由 $R_f \gg \frac{1}{2\pi f C}$ 以及三角波幅度关系 $2B \approx \frac{A}{R_1 C} \frac{T}{2}$ （其中 A 为方波幅度，B 为三角波幅度），可推导出 $R_f \gg \frac{2B}{\pi A} R_1$ 。实验中通常取：

$$R_f > 10R_1 \quad (4)$$

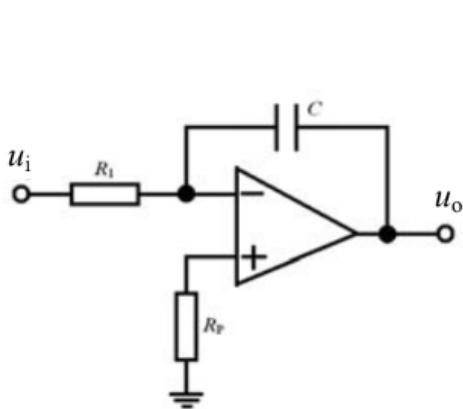


图 1：反相积分器电路

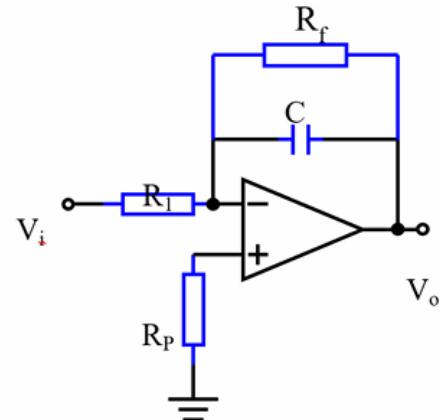


图 2：积分漂移补偿电路

2. 迟滞比较器

迟滞比较器引入正反馈，具有两个阈值电压。设稳压管稳压值为 V_Z ，正向导通电压为 V_D 。

1. 当 $V_6 = V_{OH}$ 时（输出为高电平）：同相输入端电压 V'_+ 为：

$$V'_+ = \frac{R_{43}}{R_{43} + R_{44}}(V_Z + V_D) + \frac{R_{44}}{R_{43} + R_{44}}V_{42i} \quad (5)$$

- 要使输出稳定为 V_{OH} ，需 $V'_+ > 0$ ，即 $V_{42i} > -\frac{R_{43}}{R_{44}}(V_Z + V_D) = -V_{TH}$ 。
- 要使输出翻转为 V_{OL} ，需 $V'_+ < 0$ ，即 $V_{42i} < -V_{TH}$ 。

2. 当 $V_6 = V_{OL}$ 时（输出为低电平）：同相输入端电压 V_+'' 为：

$$V_+'' = -\frac{R_{43}}{R_{43} + R_{44}}(V_Z + V_D) + \frac{R_{44}}{R_{43} + R_{44}}V_{42i} \quad (6)$$

- 要使输出稳定为 V_{OL} ，需 $V_+'' < 0$ ，即 $V_{42i} < \frac{R_{43}}{R_{44}}(V_Z + V_D) = V_{TH}$ 。
- 要使输出翻转为 V_{OH} ，需 $V_+'' > 0$ ，即 $V_{42i} > V_{TH}$ 。

3. 阈值电压：综上，迟滞比较器的两个翻转阈值为 $\pm V_{TH}$ ，其中：

$$V_{TH} = \frac{R_{43}}{R_{44}}(V_Z + V_D) \quad (7)$$

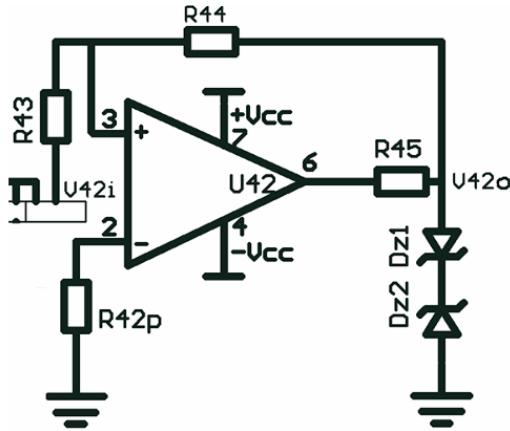


图 3: 迟滞比较器电路

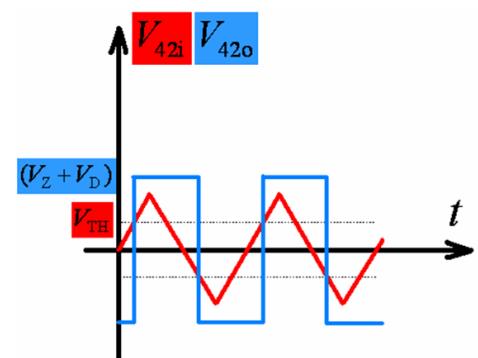


图 4: 迟滞比较器理论波形

3. 方波-三角波发生器

该电路由迟滞比较器和积分器级联构成环路。比较器输出方波，积分器将方波积分成三角波，三角波又作为比较器的输入触发翻转，从而产生振荡。

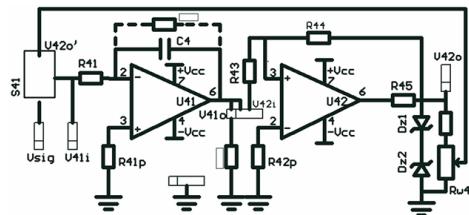


图 5: 方波-三角波发生器电路

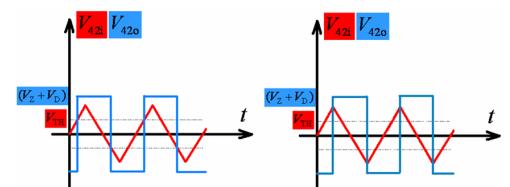


图 6: 方波-三角波发生器理论波形

三、主要仪器设备

1. 实验用电路板
2. 示波器
3. 信号发生器

四、实验设计与测试步骤、数据记录

反相积分器设计与测试

1. 电路设计

要求设计反相积分电路，将幅度 $A = 2.2V$ 、频率 $f = 500Hz$ 的方波转换为幅度 $B = 2V$ 的三角波。

根据积分原理，在半个周期 $T/2$ 内，积分器输出电压的变化量（即三角波峰峰值 $2B$ ）满足以下公式：

$$2B = \frac{A}{R_1 C} \cdot \frac{T}{2}$$

其中 $T = 1/f = 2ms$ ，电容选取 $C = 0.022\mu F$ 。将数据 $A = 2.2V, B = 2V$ 代入上式求解 R_1 ：

$$R_1 = \frac{A \cdot T}{4B \cdot C} = \frac{2.2 \times 2 \times 10^{-3}}{4 \times 2 \times 0.022 \times 10^{-6}} = 25k\Omega$$

实验中电阻取标称值 $R_1 = 24k\Omega$ 。为抑制积分漂移，取 $R_F \approx 10R_1$ ，选取标称值 $R_F = 270k\Omega$ 。

2. 测量结果

连接电路，双踪显示输入方波与输出三角波（图 7）。

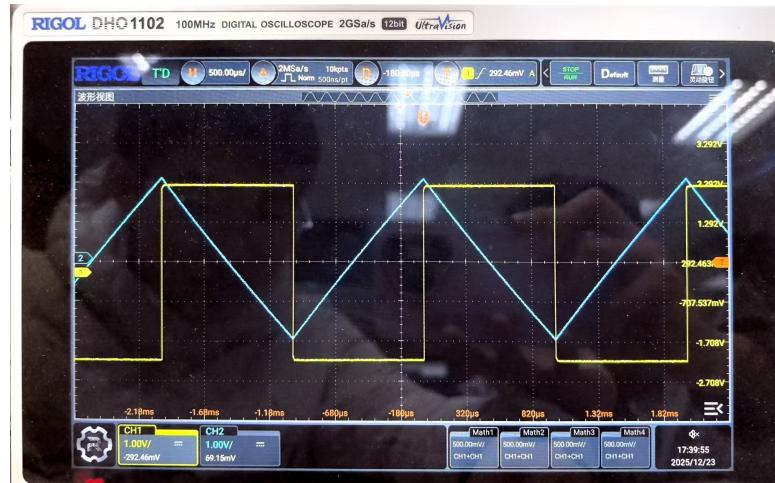


图 7: 反相积分器输入输出波形

(1) 幅度测量

表 1: 反相积分器幅度测量数据

测量项目	峰峰值 (V_{pp})
输出三角波	4.125 V
输入方波	4.453 V

根据设计要求，三角波的理论峰峰值应为 $2B = 4.0V$ 。实测峰峰值为 4.125V。计算其相对误差：

$$\delta = \frac{|4.125 - 4.0|}{4.0} \times 100\% = \frac{0.125}{4.0} \times 100\% \approx 3.13\%$$

误差较小，主要来源于电阻电容的标称值误差及读数误差，整体符合设计要求。



图 8: 三角波幅度测量

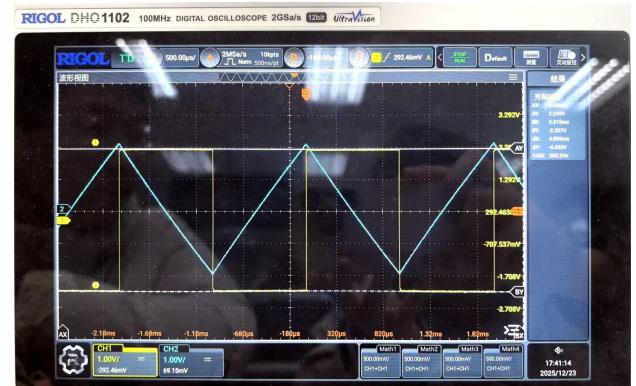


图 9: 方波幅度测量

(2) 积分漂移与直流分量观测

分别测量接入 R_F 和断开 R_F 时的输出信号直流特性：

- 接入 R_F (正常工作)：通过比较直流耦合与交流耦合的波形峰值，计算直流分量约为 **-93.75 mV**。
- 断开 R_F (漂移现象)：积分电路失去直流负反馈，输出发生严重漂移。比较图 10 与图 11，计算得到漂移值约为 **-1.484 V**。

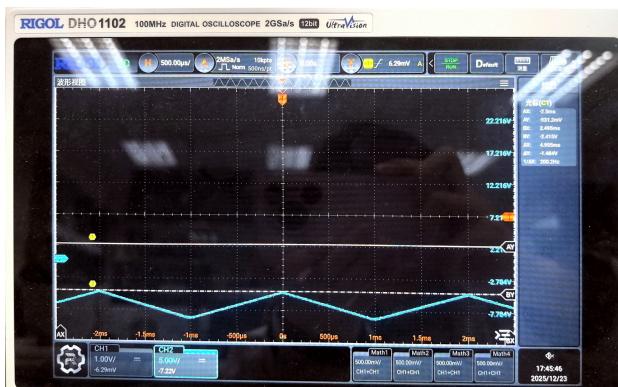


图 10：断开 R_F 直流耦合 (漂移)



图 11：断开 R_F 交流耦合

迟滞比较器设计与测试

设计要求：阈值电压 $V_{TH} = \frac{1}{2}(V_Z + V_D)$ 。电路选取标称电阻 $R_{43} = 100k\Omega$, $R_{44} = 200k\Omega$ 。输入频率 500Hz、幅度 7V 的三角波，测量传输特性曲线。

- 实测波形如图 12 所示。
- 测得阈值电压 $V_{TH} = 3.975V$ 。

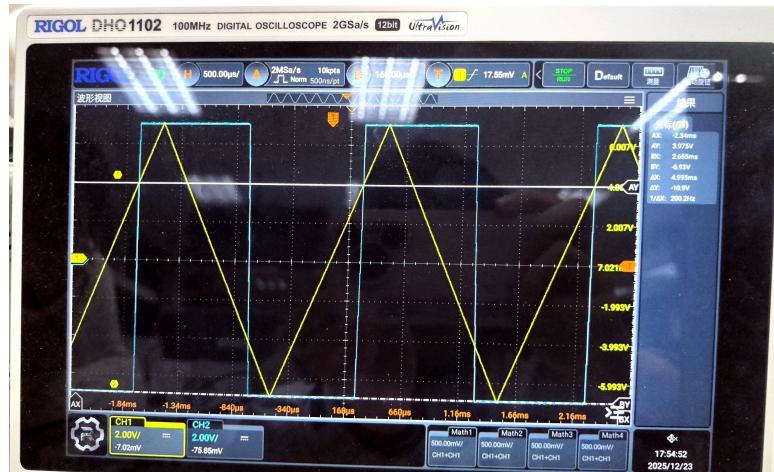


图 12：迟滞比较器特性曲线与阈值测量

安装电路，输入 500Hz 三角波，观察输入、输出信号。

- (1) 幅度关系：三角波的输入峰峰值为 $V_{pp} = 14V$ ，输出的方波峰峰值为 $V_{pp} = 13.860V$ ，输入输出波形峰峰值较为接近，且读图可发现在 $\pm 3.975V$ 处相交。
- (2) 相位与时序关系：两者具有严格的积分对应关系。
 - 由于采用反相积分器，在方波处于高电平的大部分时间里，三角波线性下降；
 - 在方波处于低电平的大部分时间里时，三角波线性上升。
 - 方波的跳变沿（上升沿/下降沿）与对应三角波的峰值（波谷/波峰）存在一定的偏差，方波的过零翻转时刻前后对应三角波幅度的极值点。

方波-三角波发生器研究

断开比较器的外部信号输入，将其输出反馈至积分器输入，构成自激振荡电路。调节电位器 R_{w4} 改变比较器的阈值，观察输出频率与电压 V'_{42o} 的关系。

1. 频率调节特性

实验发现，当内部控制电压 V'_{42o} 上升时，输出信号频率也随之上升。下图展示了不同控制电压下的波形对比，图 13 中 V'_{42o} 较低，频率较低；图 14 中 V'_{42o} 较高，频率较高。

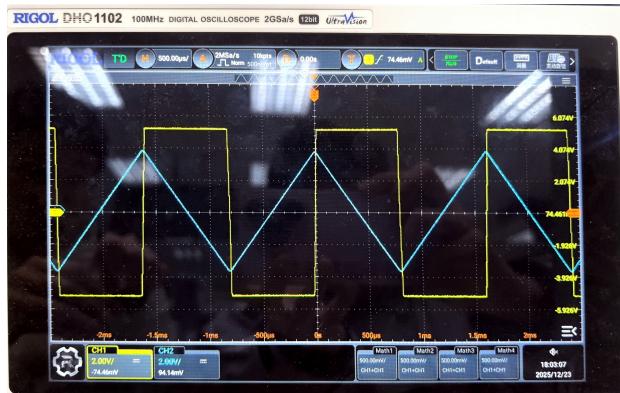


图 13: 较低频率输出波形

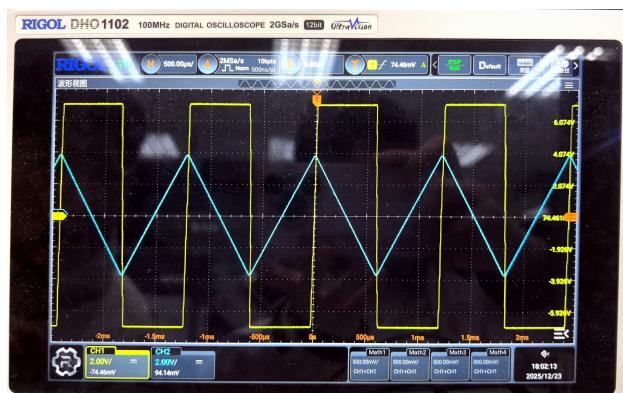


图 14: 较高频率输出波形

2. 频率范围测量

- 最低频率 (f_L): 测量周期 $T_L \approx 14.4\text{ms}$, 计算得 $f_L = 1/14.4\text{ms} \approx 69.4\text{Hz}$ (波形见图 15)。
- 最高频率 (f_H): 测量周期 $T_H \approx 1.22\text{ms}$, 计算得 $f_H = 1/1.22\text{ms} \approx 819.7\text{Hz}$ 。

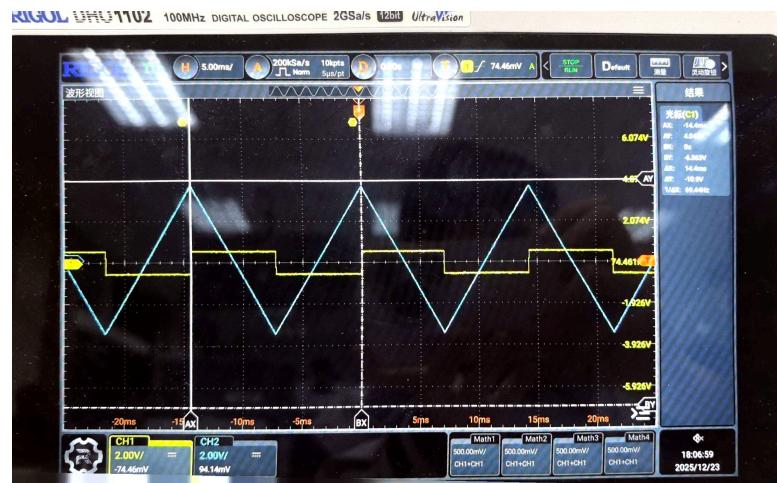


图 15: 最低频率测量波形

五、实验总结

1. 反相积分器性能验证:

- 成功将方波转换为三角波，实测电路设计参数 ($R_1 = 24k\Omega$, $C = 0.022\mu\text{F}$) 与理论计算吻合。

- 重点验证了反馈电阻 R_F 对积分漂移的抑制作用。数据表明，接入 R_F 后直流分量仅为 -93.75 mV ，而断开 R_F 后漂移量高达 -1.484 V 。这量化地证明了直流负反馈能将漂移抑制在极低水平（改善了约 15 倍），有效解决了积分电路的饱和问题。
2. 迟滞比较器特性验证：实测阈值电压 $V_{TH} \approx 3.975\text{V}$ ，与设计值相符。通过传输特性曲线观察到了清晰的滞回环，验证了迟滞比较器具有良好的抗干扰能力，即只有当输入信号幅度变化超过回差电压 ($2V_{TH}$) 时，输出状态才会翻转。
3. 波形发生器频率可调性：利用迟滞比较器和积分器的闭环级联，成功实现了方波-三角波的自激振荡。实验验证了通过调节电位器 R_{w4} （改变比较器阈值），可以有效地在宽范围内（约 69.4Hz 至 819.7Hz ）调节输出信号频率，频率覆盖范围超过一个数量级，电路工作稳定。

六、心得与体会

在书本学习积分器时，往往假设运放是理想的。而在本次实验中，我直观地观察到了“积分漂移”现象。当去掉反馈电阻 R_F 后，输出波形迅速向负电源电压漂移，这让我深刻理解了运放输入失调电压 (V_{IO}) 和偏置电流 (I_B) 在纯积分电路中是如何被随时间累积放大的。这让我明白了在模拟电路设计中，必须考虑非理想参数并设计补偿电路。

本次实验同时涉及了积分器（负反馈）和迟滞比较器（正反馈）。通过实验，我更清晰地辨析了两种反馈的区别：负反馈用于维持系统线性工作（如积分波形生成），而正反馈则引入了迟滞和双稳态特性。这种对比加深了我对反馈理论的理解。

七、思考题

1. 反相输入滞回比较器与同相输入滞回比较器的传输特性曲线有何不同？

答：主要区别在于输出跳变的方向与输入电压变化的关系不同：

- (a) 反相输入滞回比较器：输入信号 v_i 接反相端。当输入电压 v_i 增大超过上阈值 V_{TH+} 时，输出由高电平跳变为低电平；当输入电压减小低于下阈值 V_{TH-} 时，输出由低电平跳变为高电平。其传输特性曲线呈反向。

(b) 同相输入滞回比较器：输入信号 v_i 接同相端。当输入电压 v_i 增大超过上阈值 V_{TH+} 时，输出由低电平跳变为高电平；当输入电压减小低于下阈值 V_{TH-} 时，输出由高电平跳变为低电平。其传输特性曲线呈同向。

2. 为什么说过零比较器的抗干扰能力差，怎样改进提高比较器抗干扰能力？

答：

(a) 原因：过零比较器的阈值电压单一且固定（通常为 0V）。当输入信号在过零点附近存在微小干扰或噪声时，若噪声幅度超过了比较器的灵敏度，会导致输出在过零点附近产生多次错误的翻转，出现“抖动”现象，因此抗干扰能力差。

(b) 改进方法：引入正反馈，将过零比较器改为滞回比较器。利用其具有两个阈值电压 (V_{TH+} 和 V_{TH-}) 的回差特性，只要干扰信号的幅度小于回差电压 ΔV_T ，比较器就不会发生误翻转，从而显著提高抗干扰能力。

3. 如何用运放产生锯齿波？

答：锯齿波是一种上升时间和下降时间不对称的三角波。基于方波-三角波发生器电路，通过改变积分器的充放电时间常数来实现：

- 在积分器的输入回路电阻上并联由二极管和电位器组成的单向分支电路。
- 利用二极管的单向导电性，使积分电容 C 的充电回路电阻 R_{ch} 和放电回路电阻 R_{dis} 不相等。
- 调节电位器，使得充电时间常数 τ_1 远大于放电时间常数 τ_2 （或反之），从而使输出波形的上升斜率与下降斜率不同，形成锯齿波。

4. 正弦波发生器中，如不能起振，可能是什么原因，应怎样处理？如波形失真严重，又该如何处理？

答：

(a) 不能起振：

- 原因：电路的起振条件是 $|AF| > 1$ 。若不能起振，通常是因为负反馈回路的增益过小，或者选频网络参数不匹配导致正反馈不足。

- **处理：**调节负反馈电阻 R_f ，增大放大倍数，使其满足起振条件。同时检查电路连线及运放是否正常工作。

(b) 波形失真严重：

- **原因：**起振后若回路增益 $|AF|$ 远大于 1，运放会进入非线性区导致输出削顶或削底失真。
- **处理：**减小放大倍数，或检查稳幅环节，如检查二极管、热敏电阻等是否接入并正常工作，使增益稳定在 $|AF| = 1$ 附近。

5. 在波形发生器各电路中，“相位补偿”和“调零”是否需要？为什么？

答：

(a) 相位补偿：

- 对于内部已补偿的运放（如 $\mu A741$ ），一般不需要外接相位补偿。
- 但对于未补偿的高速运放，为了防止在高频段产生寄生振荡，通常需要外接相位补偿电容。在正弦波发生器中，为了保证振荡频率单纯由选频网络决定，防止高频自激，适当的补偿是必要的。

(b) 调零：

- **需要**，特别是对于积分电路。
- **原因：**运放的输入失调电压 V_{IO} 和输入偏置电流 I_B 在积分电路中相当于一个直流输入信号，会被随时间积分，导致输出产生积分漂移，最终使波形产生直流偏置甚至饱和。通过调零可以减小这种误差，保证波形对称且不饱和。