

## 积分电路的设计

### 一. 实验目的：

1. 学习简单积分电路的设计与调试方法。
2. 了解积分电路产生误差的原因，掌握减小误差的方法。

### 二. 预习要求

1. 根据指标要求，设计积分电路并计算电路的有关参数。
2. 画出标有元件值的电路图，制定出实验方案，选择实验仪器设备。
3. 写出预习报告

### 三. 积分电路的设计方法与步骤

积分电路的设计可按以下几个步骤进行：

#### 1. 选择电路形式

积分电路的形式可以根据实际要求来确定。

若要进行两个信号的求和积分运算，应选择求和积分电路。若只要求对某个信号进行一般的波形变换，可选用基本积分电路。基本积分电路如图 1

所示：

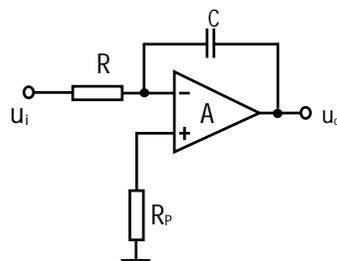


图 1 基本积分电路

#### 2. 确定时间常数 $\tau = RC$

$\tau$  的大小决定了积分速度的快慢。由于运算放大器的最大输出电压  $U_{omax}$  为有限值（通常  $U_{omax} = \pm 10V$  左右），因此，若  $\tau$  的值太小，则还未达到预定的积分时间  $t$  之前，运放已经饱和，输出电压波形会严重失真。所以  $\tau$  的值必须满足：

$$\tau \geq \left| -\frac{1}{U_{omax}} \int_0^t u_i dt \right|$$

当  $u_i$  为阶跃信号时， $\tau$  的值必须满足：

$$\tau \geq \left| -\frac{Et}{U_{o\max}} \right| \quad (E \text{ 为阶跃信号的幅值})$$

另外，选择  $\tau$  值时，还应考虑信号频率的高低，对于正弦波信号  $u_i = U_{im} \sin \omega t$ ，积分电路的输出电压为：

$$u_o = -\frac{1}{\tau} \int U_{im} \sin \omega t dt = \frac{U_{im}}{\tau \omega} \cos \omega t$$

由于  $\cos \omega t$  的最大值为 1，所以要求：

$$\frac{U_{im}}{\tau \omega} \leq U_{o\max} \quad \text{即：} \quad \tau \geq \left| \frac{U_{im}}{U_{o\max} \omega} \right|$$

因此，当输入信号为正弦波时， $\tau$  的值不仅受运算放大器最大输出电压的限制，而且与输入信号的频率有关，对于一定幅度的正弦信号，频率越低  $\tau$  的值应该越大。

### 3. 选择电路元件

1) 当时间常数  $\tau = RC$  确定后，就可以选择 R 和 C 的值，由于反相积分电路的输入电阻  $R_i = R$ ，因此往往希望 R 的值大一些。在 R 的值满足输入电阻要求的条件下，一般选择较大的 C 值，而且 C 的值不能大于  $1 \mu F$ 。

#### 2) 确定 $R_p$

$R_p$  为静态平衡电阻，用来补偿偏置电流所产生的失调，一般取  $R_p = R$ 。

#### 3) 确定 $R_f$

在实际电路中，通常在积分电容的两端并联一个电阻  $R_f$ 。 $R_f$  是积分漂移泄漏电阻，用来防止积分漂移所造成的饱和或截止现象。为了减小误差要求  $R_f \geq 10R$ 。

### 4. 选择运算放大器

为了减小运放参数对积分电路输出电压的影响，应选择：输入失调参数 ( $U_{I0}$ 、 $I_{I0}$ 、 $I_B$ ) 小，开环增益 ( $A_{uo}$ ) 和增益带宽积大，输入电阻高的集成运算放大器。

## 四. 积分电路的调试

对于图 1 所示的基本积分电路，主要是调整积分漂移。一般情况下，是调整运放的外接调零电位器，以补偿输入失调电压与输入失调电流的影响。调整方法如下：先将积分电路的输入端接地，在积分电容的两端接入短路线，将积分电容短路，使积分电路复零。然后去掉短路线，用数字电压表（取直流档）监测积分电路的输出电压，调整调零电位器，同时观察积分电路输出端积分漂移的变化情况，当调零电位器的值向某一方向变化时，输出漂移加快，

而反方向调节时，输出漂移变慢。反复仔细调节调零电位器，直到积分电路的输出漂移最小为止。

## 五．设计举例

已知：方波的幅度为 2 伏，方波的频率为 500Hz，要求设计一个将方波变换为三角波的积分电路，积分电路的输入电阻  $R_i = 10k$ ，并采用  $\mu A741$  型集成运算放大器。

设计步骤：

### 1. 选择电路形式

根据题目要求，选用图 2 反相积分电路。

### 2. 确定时间常数 $\tau = RC$

要将方波变换为三角波，就是要对方波的每半个周期分别进行不同方向的积分运算。当方波为正半周时，相当于向积分电路输入正的阶跃信号；当方波为负半周时，相当于向积分电路输入负的阶跃信号。因此，积分时间都等于  $t = \frac{T}{2} = \frac{1}{500} \cdot \frac{1}{2} = 0.001s = 1ms$ 。由于

$\mu A741$  的最大输出电压  $U_{o\max} = \pm 10V$  左右，所以， $\tau$  的值必须满足：

$$\tau \geq \frac{E}{U_{o\max}} t = \frac{2V}{10V} \times 1ms = 0.2ms \quad (E \text{ 为方波信号的幅值})$$

由于对三角波的幅度没有要求，故取  $\tau = 0.5ms$ 。

### 3. 确定 R 和 C 的值

由于反相积分电路的输入电阻  $R_i = 10k$ ，故取积分电阻  $R = R_i = 10k$ 。

因此，积分电容：

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{10 \times 10^3} = 5 \times 10^{-8} F = 0.05 \mu F \quad (\text{取标称值 } 0.047 \mu F)$$

### 4. 确定 $R_f$ 和 $R_p$ 的值

为了减小  $R_f$  所引起的积分误差，取  $R_f = 10R = 10 \times 10^4 = 10^5 \Omega = 100k\Omega$

平衡电阻  $R_p$  为： $R_p = R // R_f = 10k\Omega // 100k\Omega \approx 9.1k\Omega$

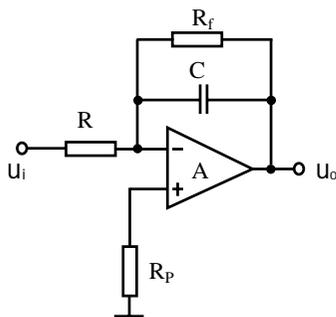


图 2 反相积分电路

## 六．实验内容

1. 设计一个积分电路, 用来将方波变换为三角波。已知方波的幅值为 2V, 频率为 1kHz。要求积分电路的输入电阻  $R_i \geq 20k\Omega$ , 采用  $\mu A741$  型集成运算放大器。

2. 按所设计的电路图进行安装和调试, 观察积分漂移现象, 将该电路调零并设法将积分漂移调至最小。

3. 按设计指标要求给所设计的电路输入方波电压信号, 观察积分电路的输出波形。记录输出波形的幅值和频率, 若达不到设计指标要求, 应调整电路参数, 直到满足设计指标为止。

4. 分析误差和误差产生的原因。

## 七．实验报告要求

实验报告包括以下内容：

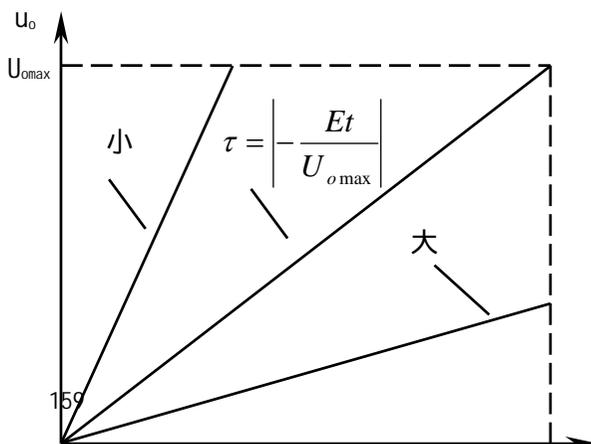
1. 项目名称
2. 已知条件和指标要求
3. 所需的仪器设备
4. 电路的设计过程, 所选用的电路原理图。
5. 调试过程, 标有经调试后所采用的元件数值的电路图。
6. 主要技术指标的测量
7. 数据处理及误差分析

## 附录：

一. 当  $u_i$  是阶跃信号时,  $\tau$  的取值对积分电路输出电压所造成的影响

当  $\tau$  的值过大时, 在一定的积分时间内, 输出电压将很低; 当  $\tau$  的值过小时,  $t$  还未达到积分时间, 积分电路就

饱和了。当  $\tau = \left| -\frac{Et}{U_{o\max}} \right|$  时,  $\tau$  的取值对积分电路输出电压不产生影响。



$u_o$  与  $u_i$  的关系如图 3 所示：

## 二．实际积分电路误差的定性分析

1．运放的输入失调电压  $U_{i0}$  和输入失调电流  $I_{i0}$  对积分电路输出电压的影响：  
图 3 积分常数 对积分电路输出电压的影响：

考虑到运放的输入失调电压  $U_{i0}$  和输入失调电流  $I_{i0}$  对积分电路的影响后，积分电路的输出电压为：

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{1}{RC} \int u_i dt + \frac{1}{RC} \int U_{i0} dt + \frac{1}{C} \int I_{i0} dt + U_{i0} \\ &= -\frac{1}{RC} \int u_i dt + \delta \end{aligned}$$

上式中， $\delta$  为误差项。由上式可知，当输入电压  $u_i$  为零时，积分电路的输出端存在一定数值的零漂移电压，这个电压随时间变化，称为积分漂移。

积分漂移是积分电路的主要误差之一，减小积分漂移的方法有：

- ． 选择失调电压小和失调电流小的运放。
- ． 选择  $R_p=R$ 。
- ． 在积分时间常数一定的情况下，尽量加大积分电容  $C$  的值。

## 2．运放的开环增益对积分电路输出电压的影响。

由于实际运放的开环增益  $A_{uo}$  不是无穷大，而是一个有限值。因此，对积分电路的输出电压也将产生影响。当输入电压为阶跃信号时，积分电路的输出电压为：

$$u_o = -\frac{E}{RC}t + \frac{E}{2A_{uo}R^2C^2}t^2$$

此时，输出电压  $u_o$  的相对误差为： $\delta = \frac{t}{2A_{uo}RC}$

因此，由上式可得出结论：

- ． 积分电路输出电压的相对误差与运放的开环增益  $A_{uo}$ 、积分时间常数  $RC$  成反比，与积分时间  $t$  成正比。
- ． 运放的开环增益  $A_{uo}$  越大，积分电路的相对误差越小。对于相同的开环增益  $A_{uo}$  和积分时间常数  $RC$ ，积分时间  $t$  越长，积分电路的相对误差就越大。
- ． 要得到比较准确的积分运算，积分时间  $t$  必须要远远小于运放的开环增益  $A_{uo}$  与积分时间常数  $RC$  的乘积。

### 3. 运放的输入电阻 $R_{id}$ 所引起的误差：

由于实际运放的输入电阻  $R_{id}$  不是无穷大，因此也将对输出电压产生一定的误差。此时，输出电压  $u_o$  所产生的相对误差为：

$$\delta = \frac{t(R_{id} + R)}{2R_{id}A_{uo}RC} = \frac{t}{2A'_{uo}RC}$$

其中： $A'_{uo} = \frac{R_{id}}{R_{id} + R}A_{uo}$ ，因此由上式可得出以下结论：

输入电阻  $R_{id}$  的作用是降低了运放的开环增益，使积分电路输出电压的相对误差增加。当  $R_{id} \gg R$  时，输入电阻  $R_{id}$  的影响可以忽略。

### 4. 积分电容的泄漏电阻 $R_c$ 对积分电路输出电压的影响

当考虑积分电容的泄漏电阻  $R_c$  对积分电路输出电压的影响时， $u_o$  的相对误差为：

$$\delta = \frac{t}{2A_{uo}(R//R_c)C}$$

由上式可看出，积分电容的泄漏电阻  $R_c$  对积分电路输出电压的影响是比较大的。因此，为了提高积分电路的运算精度，应选择漏电小，质量好的电容。

### 5. 运算放大器的有限带宽对积分电路输出电压的影响

运算放大器的有限带宽会影响积分电路的传输特性，使积分电路的输出电压产生一定的时间滞后现象。运算放大器的带宽越窄，时间滞后现象越严重。为了降低时间滞后现象，应选用增益带宽积比较大的运算放大器。运算放大器的带宽所引起的滞后时间为：

$$\Delta t = \frac{1}{A_{uo}\omega_0}$$

其中： $\omega_0 = 2\pi f_{BW}$ ， $f_{BW}$  是运算放大器在开环时的-3dB 带宽。

## 三 . $\mu A741$ 调零电路的连接图：

调零方法，接上电源后，将集成运放的输入端接地，然后调节电位器使输出电压为零。

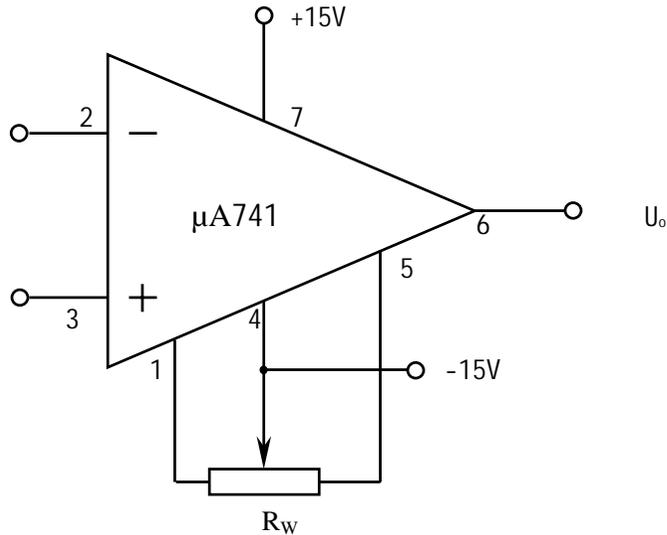


图 4  $\mu A741$  调零电路连接图 ( $R_W=1k$  )

“中国电子技术信息网”（简称“中国电子网”）是一个专业的电子技术网站，是一个提供全面电子信息的平台。我们以电子技术为核心，面向工程师的需求选取了大量技术文章与资料；同时我们以信息服务为目标，为业界提供全面的最新的行业动态和市场信息。

我们的宗旨是务实、求是、渊博。我们选取资料以实用为标准，坚决杜绝泛泛而谈或花而不实的素材出现。我们立题广而不滥，每个专题都是以网友关心的具体技术来设立。我们慎重处理每位网友的意见与需求，力求为大家提供完善的服务。

[www.EC66.com](http://www.EC66.com)