

# 实用抗工频干扰滤波器

苏安邦

(应用物理系)

## 摘 要

本文通过对检测信号干扰的分析,得出以 $1/8$ 工频周期的速度采样,并实行八次采样值平均加权滤波,结合采样器的前置滤波,可以获得对工频及其谐波分量干扰的高精度滤波。本方法的特点是利用工频同步八倍频电路,使采样速度自动跟踪工频的变化,对于工业过程信号的测量具有广泛的适用能力。文中详细介绍作者所设计的工频同步八倍频电路,并且探讨工频抗干扰滤波器在微型机上的具体实现过程。

## 一、数字滤波

在工业现场,不论对生产过程的自动控制或进行巡回检测时,输入到模/数转换器(A/D)的信号,往往窜入各种各样的干扰信号,这些干扰信号中,主要有三种类型:工频及其谐波、白噪声和脉冲干扰。其中白噪声干扰和脉冲干扰分别可用数字滤波技术和大数平均加以处理,而工频及其谐波的干扰有时成为主要干扰因素,造成很大的测量误差,影响系统的控制精度,必须加以滤除。

设检测信号  $V$  包含有真实信号  $V_i$  和一系列的工频及其谐波干扰信号  $V_f$ 。即检测到的信号为

$$V = V_i + V_f$$

其中

$$V_f = V_1 \sin \omega t + V_2 \sin 2\omega t + V_3 \sin 3\omega t + \cdots \quad (1)$$

式中,  $\omega$  是工频的角频率;  $V_1, V_2, V_3, \cdots$  分别是工频及各次谐波干扰信号的幅值。

今使检测信号通过采样周期为  $T_s$  的采样器,见图1。如果选取采样周期  $T_s = \frac{\pi}{\omega}$ , 并进行连续两次采样。第一次的采样时间设为  $t_1$ , 第二次为  $t_2 = t_1 + \frac{\pi}{\omega}$ 。显然,在  $t_1$  和  $t_2$  时采样器的输出分别为

$$V_1 = V_{i1} + V_1 \sin \omega t_1 + V_2 \sin 2\omega t_1 + V_3 \sin 3\omega t_1 + \cdots \quad (2)$$

本文 1986 年 11 月 3 日收到。

$$V_2 = V_{t_2} + V_1 \sin \omega(t_1 + \frac{\pi}{\omega}) + V_2 \sin 2\omega(t_1 + \frac{\pi}{\omega}) + V_3 \sin 3\omega(t_1 + \frac{\pi}{\omega}) + \dots$$

$$= V_{t_2} - V_1 \sin \omega t_1 + V_2 \sin 2\omega t_1 - V_3 \sin 3\omega t_1 + \dots \quad (3)$$

由于真实信号的频率一般比干扰噪声的频率低得多,因此在两次采样时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\pi}{\omega}$  很小的场合下,  $V_{t_1} \approx V_{t_2}$ . 所以两次采样的平均值为

$$\bar{V} = \frac{V_1 + V_2}{2} \approx V_{t_1} + V_2 \sin 2\omega t_1 + V_4 \sin 4\omega t_1 + \dots \quad (4)$$

由此可见,如果适当选取采样周期和采样次数,可以滤除工频和它的奇数次谐波的干扰,并且还可能滤除工频的部分偶次谐波的干扰.

基于以上设想,今选取采样周期  $T_s = \frac{\pi}{4\omega} = \frac{T}{8}$ , 其中  $T$  是工频周期. 并连续进行

八次采样,即采样时刻分别为:  $t_1, t_2 = t_1 + \frac{\pi}{4\omega}, t_3 = t_1 + \frac{\pi}{2\omega}, \dots, t_8 = t_1 + \frac{7\pi}{4\omega}$ , 代入式(1),可得采样器八次输出信号为  $V_1, V_2, \dots, V_8$ , 然后取连续八次采样的平均值  $\bar{V}$  为

$$\bar{V} = V_t + \sum_{k=0}^{\infty} V_{8k} \sin 8k\omega t_1 \quad (5)$$

式中,  $V_t = \frac{1}{8}(V_{t_1} + V_{t_2} + \dots + V_{t_8})$  是八次采样中真实信号的平均值. 可见,通过八次采样加

权平均后,从采样器输出的干扰信号的最低角频率为  $8\omega$ , 滤不掉的是频率很高的噪声.

## 二、数据混合滤波器

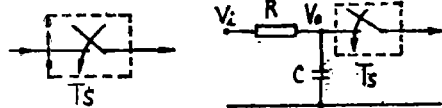


图1 采样器

图2 数据混合滤波器

为了滤除角频率较高的干扰噪声,在采样开关前面加入一个时间常数为  $\tau = RC$  的低通滤波器,见图2. 滤波器的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

滤波器的频率特性

$$G(j\omega_1) = \frac{1}{1 + j\tau\omega_1}$$

其中  $j = \sqrt{-1}$ ,  $s$  是拉普拉斯变换算子. 滤波器的幅频特性为

$$A(\omega_1) = \left| \frac{V_o}{V_i} \right|_{\omega_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_1 \tau)^2}} \quad (6)$$

由上式可得

$$\tau = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{V_o}{V_i}\right)^2} - 1} \quad (7)$$

而 $\tau$ 取决于要滤除的干扰信号的角频率。今设工频 $f=50\text{Hz}$ ，取 $\omega_1=8\omega=16\pi f$ ，设

$\frac{|V_o|}{|V_i|} \Big|_{\omega_1} = 0.001$ ，代入式(7)，则

$$\tau \approx \frac{1}{16\pi f} \times 10^3 \approx 0.4s$$

可见，在采样开关前接入时间常数 $\tau=0.4s$ 的RC低通滤波器，可以使工频的八次谐波衰减一千倍。由式(6)可知，对频率更高的干扰信号衰减得更多。但是对低频真实信号的衰减却是很少的，

为了提高滤波器的负载能力，可在RC滤波器后接入电压跟随器。(用集成运算放大器构成)。

综上所述，使检测信号先经过RC滤波器和八次采样开关处理后，可以极大地消除工频及其谐波信号的干扰，并且基本上保留了有用信号。但是要很好滤除干扰，必须满足两个条件：一是采样周期 $T_s = \frac{T}{8}$ 要准确，二是每次采集信号必须连续进行八次，然后再作算术平均处理。第二个条件可用软件来实现。而第一个条件，因 $T$ 是工频周期，它由发电厂决定。通常工频信号不可能稳定在 $f=50\text{Hz}$ ，因此，采样周期的控制不能用软件时延或计算机本身的时钟频率来进行，必需取自市电频率来同步。

三、与工频同步的采样时钟信号的产生

由工频产生八倍频的方波作为采样时钟信号，若用通常的频率倍增方法则要采用锁相环节，既复杂又昂贵。随着微处理机应用的推广和普及，七十年代以来，国内外不少工程技术人员从事简单实用的频率倍增电路的研究。图3是作者设计的八倍频电路，能很好与工频同步，且简单实用。图4是波形图。

首先，用两只零电平比较器 $A_1$ 、 $A_1'$ 和两只与非门 $G_1$ 、 $G_1'$ 构成的DTL触发器，组成方波变换电路。比较器 $A_1$ 的反相输入端接地， $A_1'$ 的同相输入端接地，使 $A_1$ 和 $A_1'$ 分别成为同相输入和反相输入方式。当工频信号为正半周时， $A_1$ 的输出为正极限值， $A_1'$ 的输出为负极限值。这时触发器的输出使 $V_{o1}$ 呈“0”状态， $V'_{o1}$ 呈“1”状态。当工频信号为

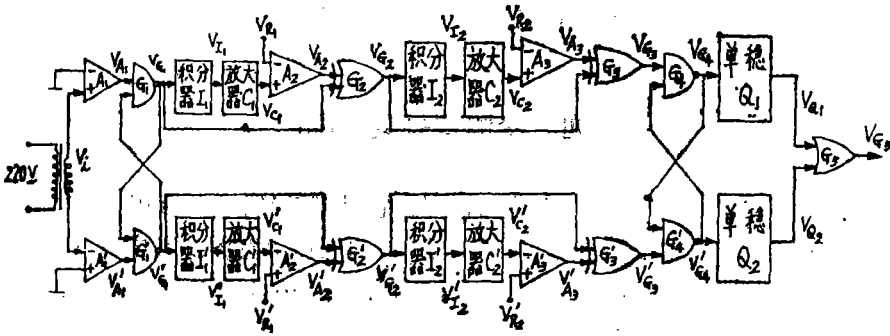


图3 八倍频电路原理图

负半周时, 触发器的输出翻转。这样就可以把工频信号变为同周期的对称方波。这种方波变换电路对工频信号的变化和外界影响具有较好的互补性和稳定性。

方波变换器右边的电路可以实现把周期为  $T$  的方波变换成八倍频矩形波。图 3 中积分器、放大器和比较器都是采用集成运算放大器构成。其中积分器  $I_1$ 、 $I_1'$ 、 $I_2$ 、 $I_2'$  和放大器  $C_1$ 、 $C_1'$ 、 $C_2$ 、 $C_2'$  都接成反相输入方式。电压比较器  $A_2$  和  $A_3$  接成同相输入方式, 其反相输入端接参考比较电压。电压比较器  $A_2'$  和  $A_3'$  接成反相输入方式, 其同相输入端接参考比较电压。这四个电压比较器的参考比较电压皆取为相应输入信号电压幅值的一半。单稳态触发器  $Q_1$  和  $Q_2$  采用 TTL 集成电路。

方波变换器的输出先分别进行四倍频处理。图 3 中的上、下两路的工作原理类同, 今介绍上一路的工作原理。

周期为  $T$  的方波  $V_{a1}$  送入积分器  $I_1$  积分并经集成运算放大器  $C_1$  放大后的信号  $V_{c1}$ , 在电压比较器  $A_2$  的输入端和参考比较电压  $V_{R1}$  比较。当输入信号电平大于  $V_{R1}$  时, 比较器  $A_2$  的输出为正极限值, 当输入信号电平小于  $V_{R1}$  时, 比较器的输出为负极限值。然后把比较器的输出  $V_{A2}$  和来自方波变换器的  $V_{c1}$  在异或门  $G_2$  中进行异或作用。由于参考比较电压  $V_{R1}$  设计为比较器输入信号电压幅值的一半, 因此, 异或门  $G_2$  的输出是对称方波  $V_{c2}$ , 其频率是  $V_{a1}$  频率的二倍。根据同样道理,  $V_{c2}$  再经  $I_2$ 、 $C_2$ 、 $A_3$  和  $G_3$  进行一次倍频。异或门  $G_3$  输出方波  $V_{c3}$  的频率是原方波  $V_{a1}$  频率的四倍。

同理, 图 3 中的下一路信号经四倍频后, 从异或门  $G_3'$  输出的方波  $V'_{c3}$  的频率也是原方波  $V'_{a1}$  频率的四倍。而且  $V_{c3}$  和  $V'_{c3}$  两列方波的高低电平刚好相反。把  $V_{c3}$  和  $V'_{c3}$  送入与非门  $G_4$ 、 $G_5$  构成的 DTL 触发器, 其输出分别触发 TTL 单稳态触发器  $Q_1$  和  $Q_2$ 。当单稳态触发器的输入端的电位出现上升阶跃时, 对应的单稳态触发器的输出为正脉冲。调节两只单稳态触发器的外接电阻  $R$  和电容  $C$ , 使其输出的正脉冲的宽度  $t_u = RC \ln 2 \leq T/16$ 。这样, 两只单稳态触发器的输出是空度比近似为  $\frac{1}{4}$  的矩形脉冲。这两列矩形脉冲经或门  $G_6$  叠加后, 形

成周期为  $\frac{T}{8}$  的脉冲串  $V_{c5}$ 。这就是和工频同步的采样开关时钟信号。

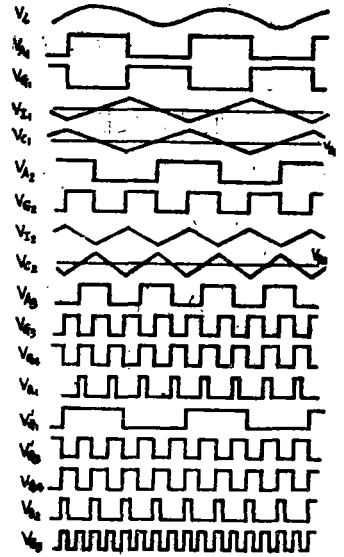


图 4 八倍频电路波形图

#### 四、检测信号采集框图

图 5 是一个实用抗工频干扰滤波电路的框图。它是模数转换模板(用  $A/D$  表示)、微型机(用  $\mu P$  表示)、外围接口适配器模板(用  $PIA$  表示)的联接示意图。其中  $A/D$ 、 $\mu P$  及  $PIA$  均分别挂在数据总线、地址总线和控制总线上。 $V_{o1}$ 、 $V_{o2}$ 、 $\dots$ 、 $V_{on}$  分别表示第 1, 2,  $\dots$ ,  $n$  个检测回路经  $RC$  滤波器的输出。 $V_{c5}$  是来自图 3 的八倍频采样时钟信号。本方法联接的特点是: (1) 检测信号  $V_{oi}$  通过  $A/D$  模板和外围接口适配器模板挂接到微型机  $D_0-D_7$  的 8 位数

据总线上。(2) 工频的八倍频矩形波接至适配器模板的中断状态控制触发器  $A$  的一个输入端  $CA_1$ 。  $\overline{IRQ}$  为中断请求信号,它是根据  $CA_1$  和  $CA_2$  的状态形成的。

图 6 是八倍频平均加权滤波器的子程序框图,这里以第  $n$  个检测点的滤波作为例子来说明。

当检测过程由第  $(n-1)$  个回路转向第  $n$  个回路时,滤波子程序的采样序号单元  $i_n$  置“1”,中间单元  $I_n$  置“8”,并将中断状态触发器  $A$  的另一个输入端  $CA_2$  置“1”。根据  $CA_2$  的状态可以控制子程序的进程。当  $CA_1 = 1$ 、 $CA_2 = 1$  时,则以中断的方式,以  $T_s = \frac{\pi}{4\omega}$  为采

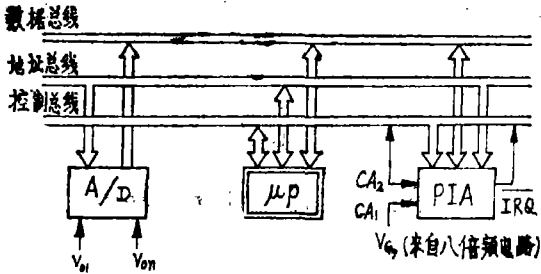


图 5 检测信号、同步信号和微机联接图

样周期,连续采样并读入 8 个  $V_0(t)$  的数据:  $V_0(1), \dots, V_0(8)$ 。每采样读入一个数据后,就将  $i_n$  单元的内容加 1,且将  $I_n$  单元的内容减 1。当连续采样读入 8 个  $V_0(t)$  数据后,则表示完成一个工频周期的滤波处理工作。然后,将读入的 8 个数据按平均加权的方法进行计算,其结果就是本次  $V_0(t)$  采样值的信号输出,用  $V_n$  表示。

为了形成一次检测自动 8 次取样的动作过程,在子程序框图中,安排一个中间存贮单元  $W_1$ ,其作用是形成频率为  $8\omega$  的同步时序脉冲信号。譬如,当  $i_n = 1$  采样读入  $V_0(1)$  以后,如果采样时序信号  $V_{0s}$  还处于“1”状态,这时需要踏步等待,直到下一个  $8\omega$  时序脉冲到来,才可以继续采样并读入  $V_0(2)$ 。当  $CA_1$  和  $CA_2$  的状态均为“1”时,则产生中断请求信号,表示可以采样读入一个数据。当  $CA_1$  和  $CA_2$  有一个状态不是“1”,则屏蔽中断请求信号。程序一旦转入  $n$  回路的检测子程序,由于中间存贮单元  $W_1$  受到  $CA_1$  状态的控制,连续采样一直进行到  $I_n = 0$  为止。至此,可以转向对另一检测回路进行检测滤波了。

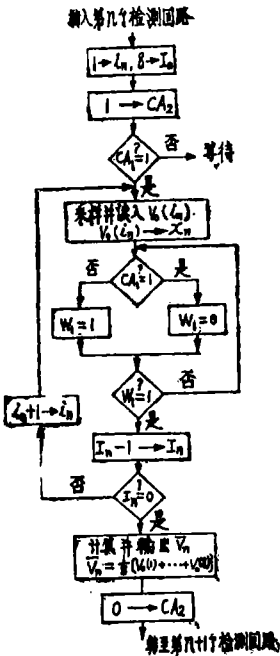


图 6 检测滤波子程序框图

参 考 文 献

〔1〕王正光等编,数据采集与处理,国防工业出版社,(1985)。  
〔2〕Pasahow, E. J., Learning Digital Electronics Through Experiments, (1982)。  
〔3〕Woollard, B.G., Digital Integrated Circuits and Computers, (1978)。  
〔4〕秦世才等编著,集成运算放大器应用原理,天津科学技术出版社,(1983)。

- 〔5〕 恽纪昌等编著, 自动测试通用接口系统, 机械工业出版社, (1985)。  
〔6〕 白英彩主编, 微型计算机常用芯片手册, 上海科学技术出版社, (1984)。

## An Anti-Interference Filter Deals with Power Frequency Interference

Su Anbang

### Abstract

This paper presents a method of high-precision filtering in opposition to power frequency and its harmonic component interference.

This method, based on the analysis of interference to detection signal, is characterized by a sampling period of one-eighth power frequency, a filtering of weighted average eight times sampling values, and combining with previous filtration in the sampler.

By taking advantage of a synchronous eight times frequency circuit which was designed by the author, and by assuring the sampling period keeps pace with the change of power frequency, this method would be useful in measuring the signal in various industrial processes.

The execution of this anti-interference filter on the microcomputer is discussed.