第11卷 第4期 郑州工学院学报 Vol.11 No.4
1990年 12 月 Journal of ZhengZhou Institute of Technology Dec. 1990

数字滤波在静态测量中的应用*

王 伟 陈静波

(郑州工学院数理力学系)

摘 要: 本文主要介绍了数字滤波在精确静态再线测量中的应用。实践证明，在精确静态再线测量中使用数字滤波不仅简便易行，而且提高了测量系统的精度和稳定性。对于各种采用微处理机的数字测量系统和智能仪表都是适用的。

关键词: 数据处理，数字滤波，自动测试

近年来，随着 VLSI 技术的迅猛发展，微处理机技术已在测试领域得到广泛应用。微处理机技术除了能使测试实现数字化、智能化外，还能充分利用微处理机数字运算方面的特长，对测量数据进行再线处理，如进行非线性补偿，自动校零等，消除系统的确定性误差，提高系统的测量精度。然而，测量系统中除了确定性误差之外，由于随机噪声干扰的影响，仍不可避免地存在着偶然误差，从而影响测量的准确性和稳定性。尽管硬件可以采用各种屏蔽技术和模拟滤波的方法减小随机噪声干扰的影响，但由于对产生干扰的途径和性质不甚了解，因此用屏蔽和模拟滤波的办法未必能有效地抑制噪声干扰。再者，采用屏蔽技术需要有一定的电子线路知识和实践经验，模拟滤波在具体实现上技术要求较高，否则还会给系统带来新的干扰，因此用这两种方法来消除噪声干扰有一定的局限性。如果在有微处理机的测试系统中，用程序来实现数字滤波，则能弥补屏蔽和模拟滤波的缺陷，从而有效地抑制各种干扰的影响，改善系统的测量精度和稳定性。

数字滤波就是借助于一系列数字运算来达到数据平滑的目的，该法在动态测量中用的较多，但在静态测量中，尤其是静态再线测量中的应用还不多见，只有少量文献给予介绍[1]。过去静态测量中所用的数字滤波方法，如五点三次平滑法等，没有考虑数据之间的相关性，因此测量结果的方差仍然很大，稳定性较差。此外这些方法的最大缺陷是不能实现实时处理，测量结果无法实时显示。为此本文介绍几种数字滤波器在静态再线测量中的应用，这几种滤波器的特点是：数学模型简单，易于实现，内存开销少，计算速度快。

1 数字滤波在检拾奇异项中的应用

由于传输线中信号的丢失、数字化装置出现故障或差错等原因，数据采集系统在工作中有时会引入一些虚假数据。在数据处理时，这些错误的数据点便混在大量正确数据之

* 收稿日期: 1989.04.12

中，作为正确数据而出现。但是，这些点的数据并不真正代表被测物理参数的实际值，而是测量过程中偶而出现的坏点，我们称这种数据点为奇异项。这些奇异项的存在，会使数据处理误差大大增加。例如，我们想求某一项被测的物理量的平均值，它们从 t_1 到 t_4 时刻的取值分别为 10、12、12、14，其平均值应为 12。如果 t_3 时刻的取值由于某种原因丢掉了，也就是出现了奇异项，那么，4 个点的平均值就由 12 降为 9。这个均值误差是由奇异项引起的。为了尽可能减小数据处理的误差，在数据处理以前，要把这些奇异项检拾出来，同时在该点补上一个合适的值。

一般说来，物理量的变化都是连续的。根据这一特性，可用数字滤波的方法来检拾奇异项。滤波器的数学模型可用一阶差分方程表示为：

$$\hat{x}_t = x_{t-1} + (x_{t-1} - x_{t-2})$$

式中：$\hat{x}_t$ ——t时刻的滤波值；

x_{t-1} ——t－1时刻的采样值；

x_{t-2} ——t－2时刻的采样值。

我们用 t 时刻的滤波值 $\hat{x}_t$ 和 t 时刻的采样值 x_t 进行比较，然后判断 t 时刻的采样值是否是奇异项。其判断准则是：给定一个差限，即给定一个误差窗口 W，当 $|x_t - \hat{x}_t| > W$ 时，则认为此采样值不符合正常变化规律，是奇异项。误差窗口 W 要根据数据采集系统的采样率，物理量的变化特性决定。一般取 $W = (0.03 \sim 0.2)\hat{x}_t$。

2　数字滤波在平滑数据中的应用

在进行精确数字测量的系统中，由于随机噪声的干扰，往往在测量结果的最低有效数字位产生跳字现象。例如，某数字压力测量系统，当被测压力稳定在 $1\mathrm{Kgf/cm^2}$ 时，正确的显示值应为 1.000（即一千字），但由于随机噪声干扰的存在，实际测量显示值可能是 1.000、1.003、1.001、0.998、1.002、……；又如，当被测压力为零时，准确的显示值应为 0.000，而实际测量显示值可能是 0.000、0.004、0.001、−0.001、……。由于随机噪声干扰造成的这种跳字现象，直接影响测量精度和结果显示的稳定性。由上可见，这种跳字现象所产生的偶然误差只不过是千分之几。通常情况下，要抑制这么小的干扰是很困难的。但采用数字滤波技术却可取得较为满意的结果。下面介绍二个数字滤波器。

2.1　延迟滤波器

2.1.1　延迟滤波器的原理

对于静态测量，当被测物理量为某一稳态值时，考虑到测量结果的相干性和随机噪声干扰的不相干性，提出延迟滤波的概念．其定义如下：设 $\hat{x}_{t-1}$ 为前一次滤波的输出，x_t 为当前采样值（即滤波器输入值），$\hat{x}_t$ 为当前滤波结果，那么：

$$\left.\begin{array}{ll}\text{若} & A \leqslant x_t - \hat{x}_{t-1} < B; \quad A > 0,\ B > 0 \\ \text{则} & \hat{x}_t = \hat{x}_{t-1} + 1(\text{字})\end{array}\right\} \tag{1}$$

$$\left.\begin{array}{ll}\text{若} & A \leqslant \hat{x}_t - x_t < B \\ \text{则} & \hat{x}_t = \hat{x}_{t-1} - 1(\text{字})\end{array}\right\} \quad (2)$$

$$\left.\begin{array}{ll}\text{若} & |x_t - \hat{x}_t| < A \\ \text{则} & \hat{x}_t = \hat{x}_{t-1}\end{array}\right\} \quad (3)$$

$$\left.\begin{array}{ll}\text{若} & |x_t - \hat{x}_t| > B \\ \text{则} & \hat{x}_t = x_t\end{array}\right\} \quad (4)$$

为了说明这种延迟滤波器的滤波特性，仍以静态压力测量为例。当被测压力为零时，由于随机噪声干扰，各采样值 x_t 可能为：

$\{x_t\}$: 0.000，0.003，0.002，0.001，−0.002，0.001，0.004，…

若取 A＝2（字），B＝5（字），并将第一采样值 0.000 直接作为第一个滤波结果，即 $\hat{x}_{t-1}=0.000$，则滤波结果为：

$\{\hat{x}_t\}$: 0.000，0.001，0.001，0.001，0.000，0.000，0.001，…

对于上例，若取 A＝4（字），B 仍为 5（字），则滤波结果为：

$\{\hat{x}_t\}$: 0.000，0.000，0.000，0.000，0.000，0.000，0.001，…

对比滤波前后的数据可以看出，经滤波后，数据的平滑性提高了，且更接近准确值。

2．1．2 滤波参数 A、B 的确定

在(1)-(4)式中，A、B 为滤波器的两个参数，为正整数。需要指出的是：A、B 的值及方程中+1，−1 都是以“字”为单位的。例如，若 $\hat{x}_{t-1}=0.002$，那么：

$$\hat{x}_t = \hat{x}_{t-1} + 1\ (\text{字}) = 0.002 + 0.001 = 0.003\ (3\text{个字})$$

而：$$\hat{x}_t = \hat{x}_{t-1} - 1\ (\text{字}) = 0.002 - 0.001 = 0.001\ (1\text{个字})$$

同理：$\hat{x}_t = 1.003$ 表示是1003个字。

在描述延迟滤波器的条件方程组(1)-(4)中，只有二个未知数 A、B，因此滤波器的设计就是确定滤波常数 A、B。为了给定选择 A、B 之值的原则，首先必须分析 A、B 的值对滤波特性和测量系统的影响。现分别讨论如下：

① B 值的确定

由(4)式可见，B 的大小直接影响滤波器的工作范围。

当 $|x_t - \hat{x}_t| \geqslant B$ 则 $\hat{x}_t = x_t$

这就表明，在 $|x_t - \hat{x}_t| \geqslant B$ 时，滤波功能消失。因此，为了获得最佳的滤波效果，B 值必须大于或等于相邻两次采样值中由于噪声干扰可能产生的最大跳字数，即：

$$B \geqslant \sup|x_{t-1} - x_t| \quad (5)$$

式中 $\sup|\cdot|$ 表示上确界（即最大值）。在实际应用中，考虑到测量范围内由 A／D 变换产生的量化误差的最大值是一样的。因此，可以在被测物理量为任意稳态值时，通过对滤波前的结果反复观测，获得 $\{x_t\}$，按(5)式求得 B，一般取等号即可。B 越大，滤波器的有效工作范围越大，滤波效果也就越好。

② A 值的确定

由(1)−(3)式和举例表明，A 值的大小对滤波结果有很大影响。A 值越大，滤波器抑制干扰的能力越强，经滤波后的输出数据越平滑，即跳字越小。但另一方面，对被测物理量的稳态值进行测量时，只有当被测物理量变化 A 个字时，测量结果才有一个字的变化，这说明测量系统的分辨力（用△表示）由原来的 1 个字变成 A 个字。显然 A 值越大，测量系统的分辨力越低（即△越大）。因此选择 A 值的原则为：在测量系统分辨力允许的情况下（以不影响系统的测量精度为限），A 值愈大越好。通常可取

$A = \triangle_{允}$　　式中$\triangle_{允}$为测量系统允许的分辨力。

2．2　指数平滑滤波

2．2．1　指数平滑滤波原理

设 x_t、x_{t-1}、x_{t-2}、…为一采样序列，则 t+1 时刻的滤波值$\hat{x}_{t+1}$可写成：

$$\hat{x}_t = C_0 x_t + C_1 x_{t-1} + C_2 x_{t-2} + \cdots \tag{6}$$

其中$\{C_i\}$为权集合，上式为一线性非递归滤波器，选择不同的权$\{C_i\}$，则得到不同的滤波效果。当取 $C_0 = C_1 = C_2 = \cdots$时，为均值滤波。均值滤波的特点是新、旧采样值的权相等，即新、旧采样值对未来的影响是相同。但实际上，最新的采样值往往包含着最多的关于未来情况的信息，因此更为切合实际的方法是各时刻采样值依时间顺序加权，给新的采样值以较大的权，给旧的采样值以较小的权。为此我们选取一几何权集，其中权以常数率递减，为使权之和为 1，取：

$$C_i = \alpha(1-\alpha)^i \qquad (i = 0,\ 1,\ \cdots)$$

式中α是常数，$0 < \alpha < 1$。于是(6)式变为：

$$\begin{aligned}\hat{x}_t &= \alpha x_t + \alpha(1-\alpha)x_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 x_{t-2} + \cdots \\ &= \alpha x_t + (1-\alpha)[\alpha x_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 x_{t-2} + \cdots] \\ &= \alpha x_t + (1-\alpha)\hat{x}_{t-1}\end{aligned}$$

即：$$\hat{x}_t = \alpha x_t + (1-\alpha)\hat{x}_{t-1} \qquad t = 1,\ 2,\ \cdots \tag{7}$$

$C_i = \alpha(1-\alpha)^i (i = 0,\ 1,\ 2,\ \cdots)$在一条指数曲线上，因此(7)式称为指数平滑滤波方程。

2．2　2　滤波器参数α的选择

在用指数平滑滤波器时，选择合适的加权系数α是非常重要的。因为α选择的是否得当，直接影响着滤波结果。下面、我们首先来分析一下加权系数的作用。由：

$$\hat{x}_t = \alpha x_t + (1-\alpha)\hat{x}_{t-1}$$

可知，t 时刻的滤波值$\hat{x}_t$是 t 时刻的采样值 x_t 和 t−1 时刻的滤波值的加权平均，α 的大小体现了对过去和当前信息的偏重程度。例如当 $\alpha = 0.3$ 时，其以前 10 个时刻的加权系数 $C_{10} = \alpha(1-\alpha)^{10} \approx 0.008$，所以 10 个时刻前的数据对滤波结果已几乎没有影响，当 $\alpha = 0.05$ 时，以前 10 个时刻的加权系数 $C_{10} = 0.05 \times (1.00-0.05)^{10} \approx 0.048$，说明 x_{t-10} 对滤波结果仍有一定影响。

指数平滑滤波公式(7)可改写为：$\hat{x}_t = \hat{x}_{t-1} + \alpha(x_t - \hat{x}_{t-1})$

其中$x_t - \hat{x}_{t-1}$是 t 时刻的预报误差，因此上式表明：指数平滑滤波是用预报误差不断地对

前一时刻的滤波结果进行修正，从而得到本时刻的滤波结果；α 的大小体现了修正的幅度。α 愈大，修正幅度愈大；α 愈小，修正幅度也愈小。

通过以上分析可知，α 越大，表示越偏重近期数据所含的信息，修正的幅度也越大，采用的数据序列也越短；α 越小，修正的幅度也越小，采用的数据序列也越长。由此可以得到选择 α 的一些基本准则：

① 如果采样值的变化是由随机噪声干扰所造成，则 α 应取小一点，以减小修正幅度，使滤波结果含有较长时间的数据信息。还以静态压力测量为例，如被测压力为 $1\text{Kgf}/\text{cm}^2$ 时，显示值为：$\{x_t\}$：1.001，1.003，1.003，1.001，0.999，1.001，…
则当 $\alpha=0.3$ 时，滤波结果为：$\{\hat{x}_t\}$：1.001，1.002，1.002，1.002，1.001，1.001，…
当 $\alpha=0.1$ 时，滤波结果为：$\{\hat{x}_t\}$：1.001，1.001，1.001，1.001，1.001，1.001，…

由上可以看出，α 取小一点得到的滤波结果较大一点的平滑。

② 如果采样值的变化是由被测物理量的状态发生变化引起，则 α 应取大一点，这样就可根据当前的预报误差对原滤波结果进行大幅度的修正，使滤波结果迅速跟上物理量的变化。如被测压力从 1.000 增加到 $1.005\text{Kgf}/\text{cm}^2$ 并稳定在此值时，那么 $\{x_t\}$ 和 $\{\hat{x}_t\}$ 的关系如下：

$\{x_6\}$：1.000，1.005，1.005，1.005，1.005，1.005，…

$\alpha=0.3$ 时：$\{\hat{x}_t\}$：1.000，1.002，1.003，1.003，1.004，1.004，1.004，1.005，…

$\alpha=0.5$ 时：$\{\hat{x}_t\}$：1.000，1.003，1.004，1.004，1.005，…

$\alpha=0.7$ 时：$\{\hat{x}_t\}$：1.000，1.004，1.005，1.005，1.005，…

由此可见，$\alpha=0.3$ 时，要经过 7 次测量和滤波，其输出 $\hat{x}_t$ 才能准确反映被测物理量发生变化后的大小。而 α 为 0.5 和 0.7 时，只需经过 4 次和 2 次滤波即可。这说明此种情况下 α 应选大一点。

α 的取值范围一般以 0.01～0.3 为宜，但在早期阶段也就是仅有几个采样值的情况下，选择较大的 α 往往是有益的。α 较大，给当前采样值的权数就大，从而减小了由于初值 $\hat{x}_1$ 选择不当引起的偏差。

除了上面介绍的准则之外，还可采用其它的一些方法选取 α 值，其中比较有效的一种是：先计算出 α 取不同值时采样序列的预报误差平方和，取使预报误差平方和为最小的 α 值做为滤波参数。即：对给定的 α 值计算：

$$\hat{x}_1 = x_1$$

$$c_2 = x_2 - \hat{x}_1$$

$$\hat{x}_2 = \alpha c_2 + \hat{x}_1$$

$$c_3 = x_3 - \hat{x}_2$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$c_N = x_N - \hat{x}_{N-1}$$

并计算 $\sum_{t=2}^{N} c_t^2$。对 $0<\alpha<1$ 的其他值，如以 0.1 为间隔，重复上述运算，然后选取使 $\sum c_t^2$ 为

最小的α数值. 通常误差平方和的变化在靠近最小值处相当的平, 因此, α的选择不是临界的.

3 结束语

本文所介绍的几种数字滤波方法通过在风机性能参数自动测试装置上实际调试表明: 它们对于减小偶然误差, 改善测量精度和稳定性均有明显的作用, 对于各种随机噪声干扰均有较好的抑制能力. 可以相信, 随着信号处理理论和微机处理机技术的迅速发展, 数字滤波技术将会在各种数字测量系统、智能仪表中得到广泛应用, 并能取得良好效果.

参 考 文 献

〔1〕王厚枢, 于盛林. 精确测量中的一种非线性数字滤波器. 数据采集与处理, 1986年第三期
〔2〕王正光等. 数据采集与处理. 国防工业出版社, 1985
〔3〕C.Chaffield. The Analysis of Time Series: An Introduction. Chapman and Hall Ltd, 1980
〔4〕陈玉祥, 张汉亚. 预测技术与应用. 机械工业出版社, 1985

Digital Filter for Static Measurement

Wang Wei Chen Jingbo
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: This paper describes mainly the digital filter for accurate static on-line measurement. It is prove in practice that not noly the method is simple and easy to do, but also it raises the precision and stability of the measurement. To be sure, the methods mentioned in the paper are suitable for the intelligent and digital measurement systems with a microcomputer.

Keywords: data processing, digital filter, automatic measurement