

doi: 10.7690/bgzdh.2014.06.019

基于 Matlab 的风洞信号延迟时间计算方法

张鹏, 谢艳, 孙宁

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对风洞试验中出现天平信号与迎角信号的同步性差异过大的问题, 提出一种利用 Matlab 的计算信号间延迟时间的方法。分析了互相关函数的定义及 3 种求解互相关函数的方法, 就如何应用互相关函数计算信号间的延迟时间做了简要介绍, 并采用连续变迎角测力试验技术中的信号同步性进行了风洞试验分析。试验结果表明: 该方法能够有效地对风洞信号的同步性进行定性、定量的分析, 获得确定的信号延迟时间, 为试验数据的修正和真实试验数据的获取提供了重要保证。

关键词: Matlab; 互相关函数; 延迟时间

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Method of Calculating Wind Tunnel Signal Delay Time Based on Matlab

Zhang Peng, Xie Yan, Sun Ning

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the synchronization between the balance signal and the angle signal is not good when doing test in wind tunnel, a method based on Matlab to calculate the delay time is proposed. The definition of the cross correlation function and three methods to calculate the correlation function have been analyzed, the method how to use the correlation function to calculate the delay time has also been introduced. At last, we use this method to analyze signal synchronization in the test technique of continuous angle of attack traverses. The analysis results show that correlation function method can make qualitative and quantitative analysis of signal synchronism and get determined signal delay time. This method provides an important guarantee for data correct the test data and get the real test data.

Keywords: Matlab; cross correlation function; delay time

0 引言

长期以来, 我国高速风洞领域普遍采用“阶梯顿点平均”的方式获取飞行器缩比模型在固定迎角下的静态气动力。为更精确地反映飞行器在非线形变化或突变区域的气动力特性, 进一步提高飞行器气动力评估与预测水平, 目前在我国最大口径的高速风洞-2.4 m 跨声速风洞开展了“跨声速风洞连续采集与连续变迎角测力试验技术研究”^[1], 即在连续变飞行器缩比模型迎角的同时, 风洞测量系统连续采集获取天平、压力传感器和迎角传感器的信号, 从而通过数据处理, 获得迎角运动范围内一条近似连续的气动特性曲线的试验技术。因此, 该试验技术对信号间的同步性要求很高, 如果信号间的同步性较差, 特别是天平信号与迎角信号的同步性差异过大, 就必将造成试验结果的失真, 影响试验数据的精准度。

在数字信号处理中, 相关是一个非常重要的概念, 互相关函数常常被用来计算信号间的延迟时间,

为此, 笔者从信号处理的原理出发, 依托 Matlab 强大的计算功能和丰富的数字信号处理函数, 介绍了 Matlab 中几种计算互相关函数的方法, 并采用互相关函数方法对连续变迎角测力试验中信号的同步性进行了分析和处理, 为风洞试验连续变迎角测力试验数据精准度的提高提供了有效的保证。

1 互相关函数

1.1 互相关函数的定义

2 组随机数据的互相关函数表示 2 组数据值之间存在的依赖关系。设 2 个平稳随机信号的 2 个样本函数时间历程记录为 $x(n)$ 和 $y(n)$, 则 2 个信号的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 为

$$R_{xy}(m) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n)y(n-m) \quad (1)$$

1.2 互相关函数计算延迟时间的方法

如果 $x(n)$ 是系统的输入信号, 而 $y(n)$ 是系统的输出信号, 则可以通过输入 $x(n)$ 和输出 $y(n)$ 之间的

收稿日期: 2014-01-09; 修回日期: 2014-02-13

基金项目: 总装备部气动预研基金“跨声速风洞连续采集与连续变迎角试验技术研究”(51313040205)

作者简介: 张鹏(1985—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事信号处理研究。

互相关函数得到信号的滞后时间。具体方法是：当系统的输出与输入之间有一定的时间差时，互相关函数在时间差等于信号通过系统所需时间值时，将出现峰值；因此，系统的时间滞后，可以通过互相关函数的最高峰位置 $\tau = n\Delta t$ (Δt 为采样周期) 来确定系统的滞后时间。

2 Matlab 中互相关函数的求解方法

2.1 xcorr 函数方法

最直接的求解方法是利用 Matlab 自带的 xcorr 函数直接求解互相关函数。例如：信号 $x=[1\ 3\ 2\ 6]$ 和 $y=[0\ 0\ 0\ 1\ 3\ 2\ 6]$ 这 2 组信号，可直接在 Matlab 中写入代码： $m=xcorr(x,y)$ 求解即可。

2.2 conv 函数方法

由互相关函数和卷积的定义可知，可以利用卷积的方法计算相关函数。以上面的 2 组信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 为例，此时，只需先对 y 翻折再求卷积即可，所求互相关函数程序代码实现为 $m = conv(x(n), y'(n))$ 。

2.3 离散傅里叶变换 DFT (FFT) 方法

当循环卷积长度大于等于线性卷积结果的长度时，循环卷积等于线性卷积，可以利用 DFT 计算卷积的方法求解互相关函数。以求 $x=[1\ 3\ 2\ 6\ 2\ 1\ -2\ 0\ 1\ 5\ 3\ 2\ -3\ 0\ 1\ 2\ 0\ 3\ 1]$ 和 $y=[0\ 0\ 0\ 1\ 3\ 2\ 6\ 2\ 1\ -2\ 0\ 1\ 5\ 3\ 2\ -3\ 0\ 1\ 2\ 0\ 3\ 1]$ 这 2 组信号的互相关函数及延迟时间为例。首先对信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 求 FFT 得到 $X(k)$ 和 $Y(k)$ ，然后再对 $X(k)$ 和 $Y(k)$ 的乘积求 IFFT 即可，结果如图 1 所示，互相关函数在 $m=3$ 时有最大值，故由前面的定义可知，信号 y 对于信号 x 有 3 个时间点的延迟，这与信号 x 、 y 的定义一致。

具体代码如下：

```
x=[1 3 2 6 2 1 -2 0 1 5 3 2 -3 0 1 2 0 3 1];
y=[0 0 0 1 3 2 6 2 1 -2 0 1 5 3 2 -3 0 1 2 0 3 1];
k=length(y);
e=randn(1,k);
y=y+e;
xk=fft(x,2*k);
yk=fft(y,2*k);
rm=real(ifft(conj(xk).*yk));
%rm=[rm(k+2:2*k) rm(1:k)];
rm=ifftshift(rm);
m=-k:k-1;
stem(m,rm)
```

```
xlabel('m');
ylabel('幅度');
title('x 与 y 的互相关函数');
```

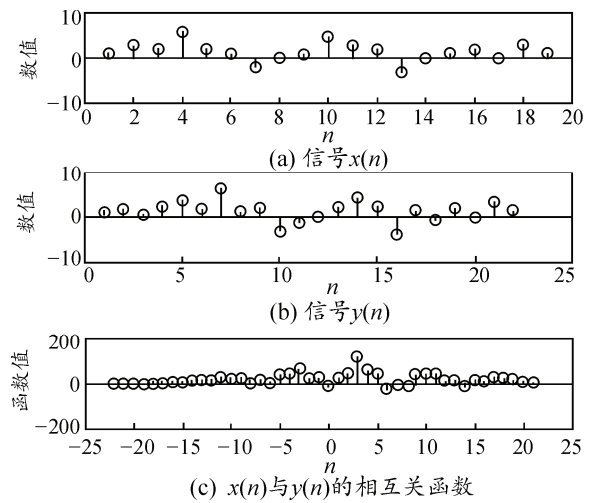


图 1 利用离散傅里叶变换 DFT (FFT) 求互相关函数的波形

3 风洞数据验证

3.1 风洞信号延迟性的计算

在风洞试验中采集到两组相关信号 a 、信号 b ，信号波形图如图 2 所示，为分析两者之间的延迟性，依靠 Matlab 采用互相关函数对 2 组信号进行分析，计算其互相关函数，由于 2 组信号直流分量太大，需要减去直流分量对其的影响后再计算两者之间的互相关函数。从互相关函数图(图 3)分析来看，两组信号之间几乎不存在延迟，互相关函数的最大值在零点附近，但细观察发现峰值两边不对称，说明有些延迟，但延迟量应该小于一个采样周期，所以需要采用双曲线内插的方法计算出延迟量的近似值，这也是计算延迟量小于一个采样周期或延迟量是非整采样周期时的一种方法。由计算可知，延迟量为 $-0.277\ 866\Delta t$ (Δt 为采样周期)。

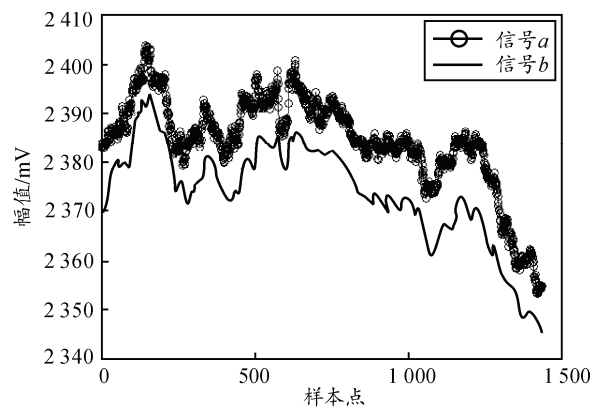


图 2 信号 a 、 b 的波形

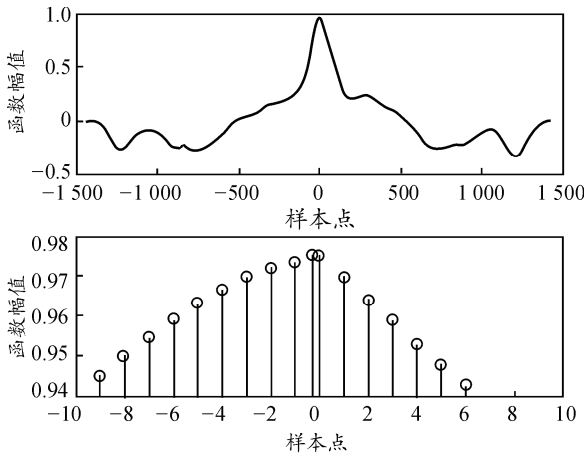


图 3 信号 a、b 的互相关函数

程序具体代码如下：

```

u=xlsread('data.xls');
a=u(:,2);
la=length(a);
plot(a);
b=u(:,3);
hold on;
plot(b,'r');
a=a-mean(a);
b=b-mean(b);
figure
[c,LAGS]=xcorr(a,b,'coeff');
subplot 211; plot(LAGS,c);
[K,V]=findpeaks(c,'q',500);
for k=1 : length(K);
D(k)=K(k)-la;

```

```

fprintf('%4d %5.6f %5.6f %5.6f\n',k,K(k),
D(k),V(k));
end
subplot 212; stem(LAGS,c); axis([-10 10 0.94 0.98]);
hold on
plot(D(2),V(2),'rO'); grid;
line([D(2) D(2)], [.94 V(2)], 'color', 'r');

```

3.2 利用延迟计算方法分析及修正天平信号

根据互相关函数的性质，假如对 $x(t)$ ， $y(t)$ 有延迟 τ_0 ，则互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 在 $\tau=\tau_0$ 时有最高峰。应用于风洞的连续变迎角测力试验中，测得 $\alpha(t)$ (迎角信号)、 $y(t)$ (天平升力元信号)、 $Mz(t)$ (天平俯仰力矩信号)，分别计算互相关函数 $R_{\alpha y}(\tau)$ 、 $R_{\alpha mz}(\tau)$ 等，再找出这些互相关函数最高峰的位置，该位置的时间就是 Y 元或 Mz 元对 α 的延迟时间。

表 1 就是利用互相关函数对连续变迎角测力试验中多种试验状态的试验数据进行计算而得到的延迟时间。从表中可以看出，1 105 次数据中的 Y 、 Mz 、 X 元的信号均超前 α 的信号 $35 \sim 55\Delta t$ 即 $0.12 \sim 0.18$ s；从表中还可以看出：在 1 106~1 111 次数据中，虽然改变了试验状态，但是因为迎角与天平的信号是同步改变的，因此这些车次数据中的 Y 、 Mz 、 X 元信号对 α 的延迟很小，只有 $-6 \sim 8\Delta t$ 即 $-0.02 \sim 0.02$ s，接近于零延迟，经过分析后认为，这个小量的延迟是由信号测量误差而引起。

表 1 用互相关函数计算各车次信号间的同步情况 (Δt =扫描间隔时间=0.003 3 s)

车次号	迎角速度/(°/s)	迎角滤波	天平滤波	$\alpha M \sim Y$	$\alpha M \sim Mz$	$\alpha M \sim X$
1105	3	ZY-2(1 Hz)	8 300(3 Hz)	超前 $39\Delta t$	超前 $35\Delta t$	超前 $55\Delta t$
1106	3	ZY-2(1 Hz)	8 300(1 Hz)	延迟 $1\Delta t$	延迟 $3\Delta t$	超前 $6\Delta t$
1107	3	ZY-2(10 Hz)	8 300(10 Hz)	延迟 $0\Delta t$	延迟 $8\Delta t$	超前 $2\Delta t$
1110	3	ZY-2(1 Hz)	8 300(1 Hz)	延迟 $1\Delta t$	延迟 $6\Delta t$	延迟 $0\Delta t$
1111	2	ZY-2(1 Hz)	8 300(1 Hz)	延迟 $1\Delta t$	延迟 $4\Delta t$	延迟 $1\Delta t$

根据互相关函数测定的延迟时间，可以对试验数据进行合理的修正。如图 4 所示，连续变迎角试验得到的试验曲线是图中的上行曲线，明显表现出对迎角信号 α 有延迟，将该试验曲线依据测定的延迟时间对试验曲线进行修正后就可以得到图中的修正后的曲线。也就是说，连续变迎角试验时，假如试验数据的各信号之间存在延迟，可以应用互相关函数进行测定，再依据互相关函数测定的结果对试验数据进行修正，最终得到没有延迟干扰的试验数据。

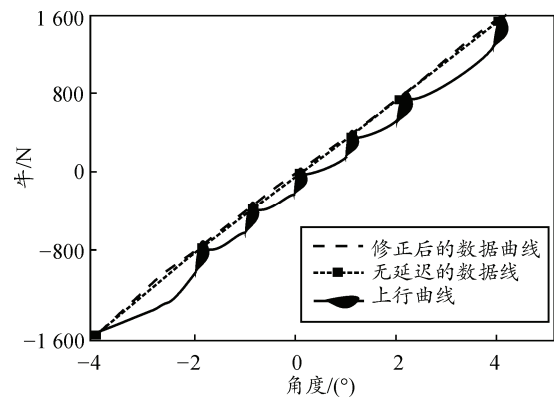


图 4 上行与无延迟的阶梯数据的 $Y-\alpha$ 曲线比较

4 结束语

基于数字信号处理原理, 笔者从互相关函数的定义出发, 简要介绍了利用 Matlab 计算信号间延迟时间的方法。由风洞试验数据分析可知, 互相关函数方法简洁易实现, 可以定性定量地分析连续变迎角测力试验中各信号到达测量系统的时序关系。即使在连续变迎角测力试验中各信号存在延迟, 也可以依据互相关函数测定的延迟时间对试验数据进行合理修正, 有效提高风洞连续变迎角测力试验数据的准确性, 达到精确反映飞行器气动力特性的目的。

参考文献:

- [1] 张鹏, 魏志, 王春, 等. 基于小波变换的风洞连续信号降噪分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(5): 63-67.
- [2] LG Brown. A survey of image registration techniques [J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325-376.

(上接第 73 页)

5 结束语

利用 MEMS 加速度计和 C8051F047 单片机组设计的倾斜姿态传感器具有体积小、重量轻、功耗低、响应速度快、使用方便等优点。通过标定和误差补偿加速度计, 测量倾角精度可达 0.03° , 在该精度下测量范围为 $-6^\circ \sim 6^\circ$ ^[6]。该倾斜姿态角传感器目前已应用于某型号高炮武器系统中, 在机械、建筑、桥梁、军事等领域也具有广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 林小波, 崔永俊, 甄国涌, 等. 基于加速度计的数字显

- [3] 路炜, 文玉梅. 供水管道泄漏定位中基于互谱的时延估计[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(3): 504-509.
 - [4] 谢春, 宋国明, 姜书艳, 等. 自适应 GA 优化 WNN 的模拟电路软故障诊断方法[J]. 计算机应用研究, 2012(1): 75-78.
 - [5] 万千, 薛明. 基于噪声分离和小波阈值自适应图像去噪算法[J]. 电子科技, 2011(5): 94-96.
 - [6] 黄勇, 汪伟. 基于软阈值小波降噪的天津 CORS 站点数据分析[J]. 城市勘测, 2011(6): 89-91.
 - [7] 李天云, 范夕庆, 汪剑波, 等. 基于小波滤波和跟踪微分器的介质损耗因数检测方法[J]. 电网技术, 2011(4): 223-226.
 - [8] 夏开旺, 廖振修, 高旭光. 基于小波分析的 GPS 接收机随机噪声研究[J]. 山西建筑, 2012(1): 233-235.
 - [9] 杨继鹏, 刘学诚. 基于小波变换的网络异常检测研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2012(1): 95-99.
 - [10] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 50-51.
- [1] 示倾角测量仪[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(1): 64-66.
 - [2] 宋明权, 周纯杰, 杨樊, 等. 基于 C8051F040 的 CAN 通讯接口的开发与应用[J]. 计算技术与自动化, 2005, 24(1): 42-45.
 - [3] 陈凯, 房立清, 张磊. 基于 MEMS 和静电探测技术的新复合引信[J]. 兵工自动化, 2012, 31(8): 1-2.
 - [4] The datasheet of SCA103T series.Rev.A VTI Technologies Oy.
 - [5] 骆云志, 张春华, 吕卫强, 等. 无人地面平台多传感器的联合外标定方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 66-72.
 - [6] 陈志毅, 周穗华, 吴志东. 低频感应式磁传感器优化设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(3): 123-124.