

海浪时域仿真的实现

王 彤 邱华洲

(哈尔滨工业大学)

〔提要〕 本文介绍了一个计算机控制的造波系统实现海浪物理仿真的方法，并讨论了仿真精度的评价方法。

一.前言

在实验水池中对各种波浪进行物理仿真是造船工业、海洋工程、海上油田开发和掠海导弹背景噪声研究的重要实验手段。随着国民经济的发展和国防建设的需要，对海洋的开发研究显得越来越重要，同时也对实验水池的造波技术提出越来越高的要求，在实验水池中的造波技术大致可分为频域造波和时域造波两大类，频域造波要求波浪满足一定的功率谱（或幅值谱）的要求，时域造波要求在水池中复现

一个真实记录的海浪信号或者一个特定形状的波浪信号，时域造波不但要求满足幅值谱的要求，而且还要满足相位谱的要求。我们采用一台以 Z80 为 CPU 的 DPS-85 微型计算机对空气式造波机进行控制，成功地实现了时域造波。

二.时域造波原理

计算机控制的空气式造波机的原理图如图 1 所示。

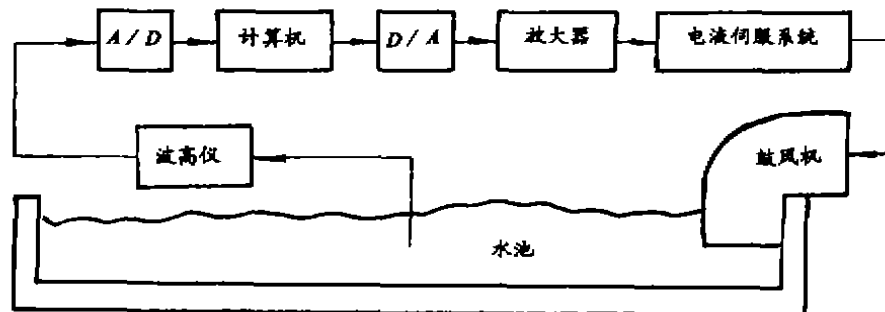


图 1 计算机控制造波机原理图

计算机通过 D/A 接口送出激励信号，经过放大器、电液伺服系统控制鼓风机风门摆角的大小，从而使鼓风机进入水池的风量大小变化，在水池中形成波浪。波高仪是测量元件，安放在水池中央距鼓风机出口处约 35 米远，计算机通过 A/D

接口采集波高仪信号进行处理计算。

如果要复现的波浪信号是 $x(t)$ ，对 $x(t)$ 进行付立叶变换可得到频谱 $X(j\omega)$ ， $X(j\omega)$ 是一个复数频谱，可表示为幅值谱 $|X(j\omega)|$ 和相位谱 $\angle X(j\omega)$ 。时域信号与其复数频谱是一一对应的。如果水池中

造出的实际波信号 $Y(t)$ 的复数频谱 $Y(j\omega)$ 与希望波的频谱 $X(j\omega)$ 一致,那么实际波 $Y(t)$ 也就与希望波 $X(t)$ 一致了。设造波系统(包括水池)的频率域模型为 $G(j\omega)$,那么我们可以导出输入激励信号 $r(t)$ 的付立叶变换 $R(j\omega)$,即

$$R(j\omega) = X(j\omega) / G(j\omega)$$

现在的问题是首先要辨识造波系统的模型 $G(j\omega)$ 。由于我们的目的是复现某一个波浪信号,也就是要复现某个信号的幅值谱和相位谱,所以对造波系统的辨识只需辨识其非参数模型,而不必辨识其参数模型。辨识一个线性系统最简单的方法是输入一个脉冲信号,这样系统的脉冲响应的付立叶变换与系统频率域模型 $G(j\omega)$ 间存在一个简单的比例关系。对水池造波系统来说,加入幅度较大的脉冲信号是不允许的,因为这样容易造成设备的机械损伤。为了使计算机程序简单,占用内存少,我们采用希望信号 $X(t)$ 作为第一次的激励信号 $r_1(t)$ 。对系统模型的辨识可以只辨识要复现的希望信号 $X(t)$ 所包含的频率成分,而其它频率部分可以不考虑。这样虽然得到的不是一个完整的模型但并不影响对希望信号 $X(t)$ 的复现。

如果由波高仪测得的第一次造出的实际波信号为 $y_1(t)$,其付立叶变换为 $Y_1(j\omega)$,那么由第一次辨识出的造波系统的模型为

$$G_1(j\omega) = Y_1(j\omega) / R_1(j\omega)$$

$$\text{式中 } Y_1(j\omega) = \text{FFT} \{y_1(t)\}$$

$$R_1(j\omega) = \text{FFT} \{r_1(t)\}$$

如果造波系统是一个理想的线性系统,这样一次计算就可以辨识出系统的模型。由于造波系统存在着非线性因素,需要迭代修正几次才能得到比较满意的结果。为了消除随机干扰和水池回波的影响,对实际采用的模型采取了加权平均的处理。

设由第 K 次激励信号 $r_k(t)$ 和实际波浪信号 $y_k(t)$ 求得的系统模型为

$$G_k(j\omega) = \frac{Y_k(j\omega)}{R_k(j\omega)} \\ = \frac{\text{FFT} \{Y_k(t)\}}{\text{FFT} \{r_k(t)\}}$$

实际采用的模型为 $G'_k(j\omega)$,是加权平均后的模型

$$G_k^1(j\omega) = \sqrt{G_k(j\omega) \times G_{k-1}(j\omega)}$$

新的激励信号的频谱为

$$R_{k+1}(j\omega) = X(j\omega) / G_k^1(j\omega)$$

由于造波系统中存在着一些非线性因素,工作点不同,求出的模型也不完全相同。复现不同的波浪信号时造波系统工作在不同的工作点,所以应该分别进行迭代辨识,使求出的模型正是处于要复现的信号的工作点条件下,这样复现信号的精度就比较高。

波浪在水中传播的速度为^{〔1〕}

$$V = \frac{gT}{2\pi}$$

式中 T —波周期,两相邻波峰经过水面上同一固定点的时间间隔
 g —重力加速度

由上式中可以看出波浪在水中传播的速度与波周期有关,或者说与波浪的频率有关,该造波系统的工作频带为 $0.4 \sim 1.2\text{Hz}$,其中 0.4Hz 的波浪从鼓风机出口处传到水池中央波高仪处需要 9 秒左右的时间,而 1.2Hz 的波浪大约需要 27 秒。这就是说存在着一个相当大的滞后环节,而且对不同频率的信号滞后时间也不相同。对于含有多个频率成分的波浪信号来说,水池中央波高仪处的波形与鼓风机出

口处的波形并不仅仅是滞后一段时间的问题,频率高的波传播速度慢,频率低的波传播速度快,两处波形的形状是大不相同的。另外,某一频率的波浪的前锋传到水池中央后还要再经过一段时间才能形成波幅比较稳定的波浪。根据实验观察,造波系统频带内频率较高的波浪从水池边上鼓风机出口处传到水池中央并形成波幅稳定的波浪约需要 30~40 秒的时间。为了使采集信号时各种频率的信号都达到水池中央波高仪处,可将激励信号连续重复几次,在最后一次输出激励信号的同时采集波高仪的信号。例如计算机的采样周期为 0.1 秒,激励信号的一个周期要输出 512 个数据,即 51.2 秒,连续重复输出两个周期的激励信号,共 102.4 秒。放过头一个周期 51.2 秒,这时各种频率的波都已到达水池中央并形成稳定的波幅,在输出第二个周期的激励信号的同时采集波高仪的信号。这样就避开了大滞后和过渡过程的影响,等效地把相位滞后看成在 $-\pi \sim +\pi$ 之间。

对于复现时域信号的指标我们采用了计算希望信号 $X(t)$ 和实际信号 $Y(t)$ 的相关系数(或称标准协方差)的方法。这种方法计算简单,得到的是一个归一化的指标。两个随机变量 X 和 Y 的协方差 $C_{ov}(X, Y)$ 为^[2]

$$C_{ov}(x, y) = E \{ [X - E(x)] [Y - E(y)] \}$$

而

$$\rho_{xy} = \frac{C_{ov}(x, y)}{D(x) D(y)}$$

称为随机变量 X, Y 的相关系数或标准协方差。

式中 $E(x)$ —— X 的数学期望

$E(y)$ —— Y 的数学期望

$D(x)$ —— X 的方差

$D(y)$ —— Y 的方差

相关系数的绝对值 $|\rho_{xy}| < 1$, 当

$|\rho_{xy}| = 1$ 时, X 与 Y 依概率 1 线性相关, 当 $\rho_{xy} = 0$ 时, X 与 Y 相互独立, 不相关。

三. 计算机软件框图与造波结果

时域造波的计算机软件框图如图 2 所示。

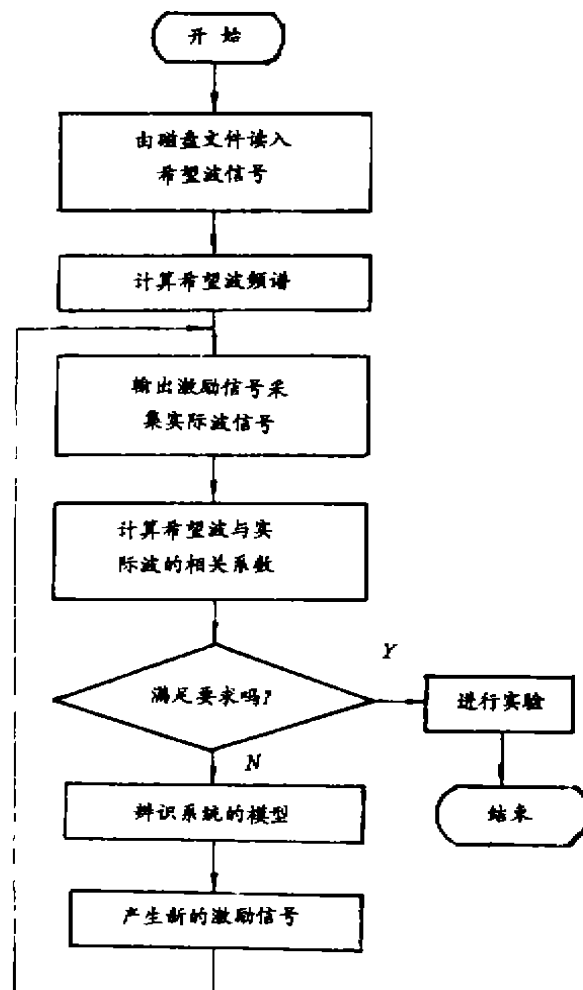


图 2 时域造波软件框图

计算机先从磁盘文件中读入要复现的希望波信号 $X(t)$, 然后计算希望波的频谱。第一次的激励信号就采用希望波, 采集到的实际波信号如果满足要求就可以用本次的激励信号作为实验时造波系统的激励信号, 进行预期的实验, 如果不满足要求就要继续修正迭代。一般经过 2~3 次迭

代之后相关系数可达到 0.95 以上。图 3 是希望波，虚线是水池中造出的实际波。

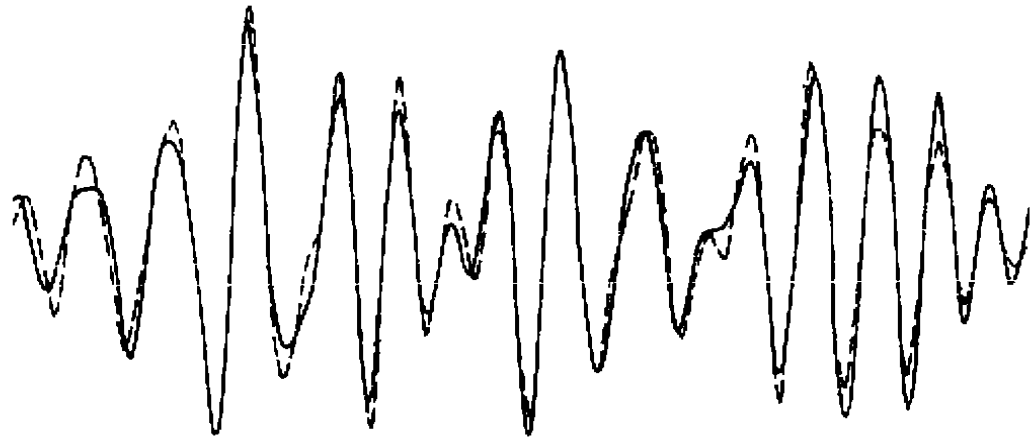


图 3 希望波和实际波波形图

从图中可以看出，造出的实际波与要求的希望波相当接近，完全能满足时域造波实验的要求。在时域造波程序的设计和调试

过程中得到中国船舶科学研究中心杨森华高级工程师的大力帮助和指导，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- (1) 陶尧森《船舶耐波性》，上海交通大学出版社，1985，PP25
- (2) 浙江大学数学系高等数学教研组《概率论与数理统计》，高等教育出版社，1979，PP120~125