

中国造船工程学会船舶力学学术委员会

中 国 海 洋 工 程 学 会

水池造波技术交流文集

上 海

1987

中国造船 编辑部

目 录

1、我国实验室波浪模拟技术发展概况.....	(1)
2、不规则波浪模拟的基本原理.....	苏伟东 (5)
3、天然波列模拟的新方法.....	刘子琪 (17)
4、造波机及造波技术原理.....	杨森华 孔翔金 (25)
5、不规则波浪模型试验的几个问题.....	俞聿修 (40)
6、造波装置及方法.....	曾金钊 袁明扬 唐慕尧 尤国铉 于家鹏 (51)
7、交大水池造波技术概论.....	俞湘三 戴李民 陈桂青 (64)
8、Z-80 机用于造波机控制及数据采集处理.....	李木国 徐万丽 (71)
9、TP801B 单板机在波浪实验数据采集实时处理中的应用.....	濮家鸣 宋 初 (78)
10、1200 信号处理机在波浪测试中的应用.....	沈蕴琦 (86)
11、上海船研所№2 水池电液伺服造波机研制概况.....	林宗熊 谢奇雄 周耀宗 刘世威 汤小戎 (98)
12、摇板式造波机造波特性试验新方法和计算方法的比较.....	朴宗熊 (109)
13、造波机受力及造波特性的计算方法.....	刘子琪 (117)
14、港池可移式生波机的设计.....	黄建维 钱大跃 (132)
15、气垫移动式造波机应用.....	谭洪顺 (142)
16、关于造波技术和造波设备的讨论.....	周家宝 张馥桂 (148)
17、分段冲箱式造波机.....	叶禄生 黄开崇 (157)
18、丹麦三维不规则造波机及水池概况.....	任佐泉 (169)
19、MES 及 DHI 不规则造波系统.....	吴 舸 刘子琪 (178)
20、三维不规则波产生器简介.....	高仲伟 (191)
21、不规则造波机系统.....	俞聿修 康海贵 李木国 (201)
22、波群引起的二阶长波在试验室的正确模拟.....	杨宪章 吴 舸 (211)
23、风浪的模拟试验.....	章家昌 (223)

我国试验室波浪模拟技术发展概况

模型试验是研究船舶、港口工程和海洋工程结构物在波浪作用下的运动、受力和安全性等问题的重要方法。要进行这种研究,就必须模拟海上环境条件,其中海浪的模拟是最主要的因素。随着船舶、港口工程和海洋工程研究的发展,对波浪模拟提出了日益广泛和严格的要求,要求模拟出不同方向的长峰波,短峰波,规则波,不规则波,过渡波,二阶长波,浪、流混合波,天然波等。它涉及到很多理论问题和技术问题。计算机技术的发展为这些问题的解决创造了有利的条件,目前国外很多学者和工程技术人员都在从事这方面的研究工作。近年来在水池造波技术方面已经取得了较大的进展。在我国,从50年代起也开始了这方面的研究工作,最初是从规则波的制造开始。从此以后,陆续地出现了不少的造波水池和水槽。根据1986年中国海洋工程学会和中国造船学会船舶力学委员会的征询资料进行的统计得知,到目前为止我国至少有39个能造波的水池和水槽(见附表)。其中水池21个、水槽18个。这些水池和水槽的尺度和形式很少雷同,它们都是根据各自的不同要求进行设计和制造的。有些水池和水槽中能模拟浅水波,有些能模拟深水波,有些则能造不同水深的波,在这些实验中所用的造波设备种类繁多有冲箱式、分段冲箱式,摇板式,分段摇板式,悬挂摇板式,平推式,悬挂平推式,摇板、推板混合式,锤击式,空气式等。造波机的布置有单边的,也有布置在相邻两边的,这些造波机大部分都是国产,也有不少是从西德、美国、日本和丹麦进口的,五花八门,应有尽有。消波设备是造波水池(水槽)不可缺少的设备。目前各实验室所用的消波器类型也有多种:有多层式斜坡,单层斜坡,抛物线形斜坡,圆弧形斜坡,在这些斜坡上铺上隔条,或碎石和竹枝。斜坡的斜度也不尽相同,从 7° ~ 15° 都有,个别实验室采用了直立消能尼龙网。这些消波器的消波效果也不一样。有关消波器消波性能研究的文章,目前报导的并不多。值得人们去重视。

在水池中造出的波浪,必须用测量装置记录下来。实验室中的波浪测量装置,在我国目前不少单位应用的是国产的KGY型电容式浪高仪,也有采用电阻式,波面跟踪式和超声波式。实践中证明,选择合适的波浪测量装置至关重要。由于某些浪高仪的质量不稳定,给试验工作增添了不少麻烦。有些浪高仪用于定点测量是可行的,若用于随车测量就会产生失真现象,影响测量精度。国内各家实验室对波浪测量装置都很重视。1985年曾于南京水利科学院河港研究所的一个大水池中进行过一次浪高仪比测试验,取得了效果。国外水池对浪高仪也极其重视,近年来在国外已经出现应用三维流速仪来检测波浪中水质点的运动速度分量,以研究三维不规则波的基本特征,在这个领域内我国和国外还存在一定的差距。

影响造波技术发展的一个重要因素是造波系统的随机控制和随机波浪的数据采集和处理。目前我国已有14个水池(水槽)能造二维不规则波,模拟P-M谱,ITTC

谱, JOHNSWAP 谱等目标谱, 有些实验室可以造过渡波、短峰波和天然波列等。造波技术的发展, 同电子计算机技术在造波系统的控制及数据采集与处理中的应用密切相关。70 年代末 702 研究所和上海交大水池先后应用 SK-1 不规则信号发生器发出的不规则信号驱动造波机制造出不规则波, 进入 80 年代, 微机得到广泛的应用, 在造波技术上也都有了新的发展。现今的 14 个水池(水槽)根据不同的条件采取了不同的方法, 例如大连工学院采用 Z80 微机, 根据目标谱和造波机系统的传递函数, 获得所需的输入电压谱, 再按皮尔逊波浪模型转换为电压随时间变化序列, 然后经 D/A 口送入造波机控制系统。同时将所产生的不规则波经 A/D 口输入。将实测谱与目标谱进行比较, 产生一个新的时间序列。再重新造波, 如此反复进行, 直到实测谱与目标谱逐步逼近为止。上海交大现已采用 TP-801 单板机来代替不规则信号发生器来控制造波机, 天津大学则用单板机进行数据采集和整理, 都取得了比较好的效果。近年来我国造波技术发展是比较快的。1986 年 10 月在建德召开的“全国第四届耐波性学术讨论会”上, 702 所及 708 所分别介绍了他们改建或新建的造波设备及在不规则波制造技术方面所做的工作。702 所和哈尔滨工业大学合作, 利用微型电子计算机控制造波机, 他们发展了两种造波程序: 一种为常用的正弦波迭加法; 另一种为白噪音加数字滤波的方法。后一种方法可以造出长时间无周期性再现的波浪时历, 对于需要试验时间很长的海上浮式工程结构的试验是非常合适的。708 所为新建的风浪流水池配置了专用的微型电子计算机, 既可控制造波机造出不规则波, 又可以对试验数据进行分析处理。他们在常用的正弦波迭加中引进了频率的随机分割法, 使造出的不规则波浪时历长时间不出现周期性的重复, 满足海上锚泊系统等各种浮式工程结构的试验需要。此外, 南京水利科学研究院河港研究所, 上海船舶运输科学研究所, 交通部天津科研所, 交通部一航局科研所, 华中工学院等单位都做了大量的工作, 研究了适合于本单位实际情况的造波技术, 百花齐放, 推陈出新。有些单位从美国(MTS), 日本(MES)和丹麦(DHI)引进了造波设备和系统软件, 具有比较先进的造波技术, 可供我们借鉴。在造波技术方面我们和国外相比还是存在着差距。这不仅是在设备系统上, 而且也表现在造波原理的研究方面。目前在不规则波模拟原理方面, 我们仍限于线性波系统范围内, 应该开展研究工作, 探讨如何能造出相似的波面谱, 相似的波列和方向谱, 二阶长波、三维不规则波、天然波的复制等机理和模拟方法, 同时还必须提高检测技术, 确保模拟波浪的真实性、稳定性和重复性等, 提高造波质量。从目前的情况来看, 在发展造波技术上我们的优势是(1)造波水池和水槽多, 除了附表中所列的水池和水槽外, 尚有一些已建成的水池和水槽未包括在内。并且有些专业实验室正在兴建中。如此众多的水池和水槽, 是我们发展波浪模拟技术的基础,(2)我们的专业队伍比较庞大, 过去分属造船和港工两个系统。通过这次两个学会的倡议, 开展具有共同性的造波技术交流, 把两个专业系统的专业人员集中到一起来了, 互相交流, 集思广益, 互相促进, 共同提高, 我国的水池造波技术一定会更快地发展。(3)我国水池造波技术发展从 60 年代算起, 已经二十多年, 在造波设备的设计与制造, 造波系统的控制, 数据采集和处理等方面, 已经积累了丰富的经验。现在又有效家的进口造波系统可供借鉴, 洋为中用, 我国造波技术的发展速度不会很慢。只要我们能够发扬我们的优势, 各个单位都发挥自己的特长, 扎扎实实地搞上几年、十几年, 我们在造波技术上可以做出成绩来, 达到国际先进水平。

造波技术交流会筹备组

序号	单位名称	水池或水槽		造波机			测量系统		测波器				
		类别	主尺度(米)	类别	结构尺寸(米)	测量范围	测量精度	波型	波高	波长(米)	厚度(米)	测量精度	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	788研究所	水池	28.0X12.0X3.2 水深1.0~2.0	磁泵	长边2.25X2.4X0.2 短边2.25X2.4X0.3	0.5~2.0Hz	$\pm 5\%$, 0.01 ± 0.3 , 0.01	长峰短波及平面短波 列布峰波正交的峰波	多模式混合材料波	长边1:1.9~2.8 短边1:1.6	1.5 2.75	1~2.1 1~2.3	良好
2	788研究所	水池	7.0X5.0X1.5	冲激	2.45X0.1X0.1	0.4~1.05Hz	0~0.1	规则波	玻璃制弹性材料波	1:1.0	1.5	1.5	尚可
3	上海船舶所	水池	19.2X10X1.5	磁泵	9.19X2.2X0.3	0.25~2.0Hz	± 0.275	长波不规则波	材料波		11.5	2.7	
4	上海船舶所	水池	5.0X6.0X2	冲激		最高0.5Hz	± 0.125	规则波	材料波	可调	5.0	可调	良好
5	上海交通大学	水池	11.0X6X0.5	冲激	5.5X1	0.5~1.25Hz	± 0.250	可透不规则波	植物性材料波		5.5		良好
6	782研究所	水池	9.0X4.0X4	空气式		0.2~1.0Hz	0.2~0.20	不规则波或脉冲波	塑料波	水面小于10°	7.0	4.0	尚可
7	782研究所	水池											
8	782研究所	水池											
9	中国三船所	水池	17.5X6X4	冲激波每式	4X0.177	波高1~6米	0.15~0.12	可透不规则波	木牌型(三层结构)	1.0, 0.0, 1.0	2.0		
10	舰船部605所	水池	51.0X5.5X5.0	空气式	每式4.45X1.1X1.1	波高2~6.5米	0.05~0.25	不规则波	塑料波	0°	3.0	1.17	良好
11	南京水利院	水池	4.0X6.0	磁泵	3.0X0.01.0	0.4~0.1.0秒	0.1~0.12	规则波					
12	南京水利院	水池	50X7.4X1.35	磁泵	17.4X1.35	0.2~0.0秒	0.01~0.3	长波短波弹性材料波	322种/0.01秒/0.01秒		17.3	1.35	良好
13	南京水利院	水池	52X1.8X1.8	平推板	1.8X1.8 冲程最大冲程0.6	0~5Hz	最大0.5	横波不规则波及产生孤立波	塑料波	1:1.0	18.0	1.70	可透0.6~0.12m的反射波
14	南京水利院	水池	长14米 水深0.30, 0.30, 0.35米, 波速0.5米/秒	开式风帆波, 波速0.5米/秒	2.03X1.0, 1.0X0.6	0.1~4秒	最大0.18~0.2波高	长波短波面上风帆形成风浪	块石材料	1:1.0	4.0	0.5	可透0.6~0.12m的反射波
15	河海大学	水池	30X1.8X0.8	多模式深流全波型	1.8X1.0	0.2~2Hz	0~0.25	孤立、深水波及浅水波全波	竹板材料	1:1.0	4.0	0.65	尚可
16	河海大学	水池	22X1.8X0.4	多模式深流全波型	1.8X0.5	0.2~2Hz	0~0.30	孤立波及浅水波	碎石竹板材料	1:1.0	5.0	0.6	良好
17	河海大学	水池	18X1.5X1.3	反散射式深水全波型	1.3X1.5	0.2~2Hz	0~0.3	孤立波或深水波	碎石竹板材料	1:1.0	5.0	1.0	良好
18	河海大学	水池	18X0.3X0.75	浅流全波型	0.3X1.0	0.2~1.2Hz	0~0.2	孤立波或浅流波	碎石竹板材料	1:1.0	5.0	0.8	良好
19	河海大学	水池	18X0.5X1.3	多模式深流全波型	0.5X1.3	0.2~1.2Hz	0~0.2	规则波精度在1°以内	碎石竹板材料	1:1.0	5.0	1.0	良好
20	河海大学	水池	15.0X0.2X0.75	多模式深流全波型	透波板0.2X1.8 斜杆高1.5米1.3	0.2~0.3Hz	0~0.2	规则波精度在1°以内	以试验对象为光源波				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
21	河南大学	水槽	15.6X0.4X0.75	其轴式或 成式或余 程度	0.4X1.0	0.2~0.25	0~0.2	规格同前度在1~1.5	以试验对象度, 无速度				
22	河南大学	水槽	60X2X1.0	悬柱式 程度		0.4~0.5秒	0.05~0.25	规格同前度在1~1.5 或0.4秒时,速度 0.5m/s	碎石铺装	11.5	5.0	1.0	良好
23	天津大学	水池	28XEXL	悬柱式 程度	二股0.3X1	0.5~4秒	0~0.25	规格同前度在1~1.5 或0.4秒时,速度 0.5m/s	碎石铺装	11.5	4.0	0.8	可达90%以上
24	天津大学	水槽	30X0.4X0.8	悬柱式 程度	0.4X0.8	0.5~6秒	0~0.25	规格同前度在1~1.5 或0.4秒时,速度 0.5m/s	碎石铺装	11.5	3.5	0.7	可达90%以上
25	天津大学	水槽	30X1X1.2	悬柱式 程度	1.2X1	0.5~3秒	0~0.30	规格同前度在1~1.5 或0.4秒时,速度 0.5m/s	碎石铺装	11.5	5.0	1.2	可达90%以上
26	交通部长海工研所	水池	30X1X1.4		30X1.2	0.2~0.5秒	0~0.40		碎石				
27	交通部天津航研所	水槽	10T1X1.5		1.5X1.5	0.2~0.5秒	0~0.40		碎石	11.5~11.7	6~7	1.2	良好
28	交通部天津航研所	水槽	41X2.5X1.0		41X2.5	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5	5.0	1.2	良好
29	交通部天津航研所	水槽	51X1.5X1.0		51X1.5	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
30	一航局科研所	水池	45X2.5X1.0		45X2.5	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
31	一航局科研所	水池	51.28X4X1.3		51.28X4	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
32	一航局科研所	水槽	37X0.5X1.0		37X0.5	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
33	一航局科研所	水槽	78X1.2X1.3		78X1.2	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
34	大连工學院海洋工程研究所	水池	40X2X0.8		40X2	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
35	大连工學院海洋工程研究所	水池	37XEXL(1~2)		37XEXL	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
36	大连工學院海洋工程研究所	水池	38XEXL(1~2)		38XEXL	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
37	大连工學院海洋工程研究所	水池	15X0.75X1.0		15X0.75	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
38	大连工學院海洋工程研究所	水槽	58.3X2X1.3		58.3X2	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好
39	中水集团工程局	水池	25X2.5X2.0		25X2.5	0.2~0.5秒	0~0.30		碎石	11.5~11.5	5~5.5	1.2	良好

不规则波浪模拟的基本原理

苏伟东

(南京水利科学研究所)

摘要 本文基于线性系统假定,对不规则波浪的室内模拟方法进行了分析,其中涉及单方向的波谱模拟、波列模拟和方向谱的模拟,以及模拟中的迭代过程,同时对于线性造波理论的一些基本问题作了初步的讨论,可供今后研究时参考。

(一) 随机波面的模拟

对于零均值、平稳、各态历经且满足一定平均功率谱函数的随机过程,有多种模拟方法,在波浪模拟中,常用以下形式的级数表达:

$$\eta^d(t) = \sum_{K=1}^N a_K \cos(\omega_K t + \phi_K^d) \quad (1)$$

其中 $\eta^d(t)$ ——波面随机过程第 d 次实现。

$$a_K \longrightarrow a_K^2 = 2 \cdot S_\eta(\omega_K) \cdot \Delta\omega / \pi$$

$$S_\eta(\omega) \longrightarrow S_\eta(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left(\left| \int_0^T \eta(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \right), \text{ 即波}$$

面的双侧平均功率谱。

T ——采样总时间

$\Delta\omega \longrightarrow \Delta\omega = (\omega_u - \omega_v) / N$, ω_u 、 ω_v 分别是圆频率取值的上下限。

$$\omega_K \longrightarrow \omega_K = \omega_v + (K - \frac{1}{2}) \Delta\omega, K = 1, 2, \dots, N$$

ϕ_K^d ——是 $0 \sim 2\pi$ 区间上均匀分布的随机变量,当固定 d 时它随 K 而变,对于固定 t , 它随 d 而变。

根据中心极限定理(1),当 $N \rightarrow \infty$ 时,这样一个过程在任意时刻 t 的一维分布都是高斯分布。

1、零均值性。(1)式所描述的过程的集合均值与时间均值都为零。集合均值这里以 $E(\)$ 表示,时间均值以 $\langle \rangle$ 表示。

$$\begin{aligned}
E(\eta^d(t)) &= \sum_{K=1}^N a_K E(\cos(\omega_K t + \varphi_K^d)) \\
&= \sum_{K=1}^N a_K (\cos \omega_K t \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi_K^d}{2\pi} d\varphi_K^d \\
&\quad - \sin \omega_K t \int_0^{2\pi} \frac{\sin \varphi_K^d}{2\pi} d\varphi_K^d) = 0 \\
\langle \eta^d(t) \rangle &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{K=1}^N a_K \cos(\omega_K t + \varphi_K^d) \right) dt \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{K=1}^N a_K \frac{1}{\omega_K} \sin(\omega_K t + \varphi_K^d) \Big|_0^T \\
&= 0
\end{aligned}$$

2、平稳性。由(1)式所确定的过程的自相关函数为：

$$\begin{aligned}
R(t, \tau) &= E(\eta^d(t) \eta^d(t + \tau)) \\
&= E\left(\sum_{K=1}^N a_K \cos(\omega_K t + \varphi_K^d)\right) \\
&\quad \times \sum_{l=1}^N a_l \cos(\omega_l t + \omega_l \tau + \varphi_l^d) \\
&= \begin{cases} 0 & \text{当 } K \neq l \\ \sum_{K=1}^N a_K^2 \cdot \frac{1}{2} \cos \omega_K \tau & \text{当 } K = l \end{cases}
\end{aligned}$$

即 $R(t, \tau) = R(\tau)$ ，与 t 无关，仅与 τ 有关，再根据过程均值为常数知(1)式是宽平稳的。

3、各态历经性。由于

$$\begin{aligned}
E(\eta^d(t)) &= \langle \eta^d(t) \rangle = 0 \\
\langle \eta^d(t) \eta^d(t + \tau) \rangle &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta^d(t) \eta^d(t + \tau) \\
&\quad \times (t + \tau) dt
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{K=1}^N a_K^2 \frac{1}{2} \cos \omega_K \tau \\
&= R(\tau)
\end{aligned}$$

所以过程也是各态历经的。

4、谱函数。对于平稳过程，运用维纳-辛钦公式，则(1)式所描述的过程的谱为：

$$\begin{aligned}
S_{\eta a}(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \\
&= \sum_{K=1}^N \frac{a_K^2}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} (e^{i\omega_K\tau} + e^{-i\omega_K\tau}) e^{i\omega\tau} d\tau \\
&= \sum_{K=1}^N \frac{\pi a_K^2}{2} [\delta(\omega - \omega_K) + \delta(\omega + \omega_K)]
\end{aligned}$$

其中 δ 为单位脉冲函数，将 $a_K^2 = 2 S_{\eta}(\omega_K) \Delta\omega / \pi$ 代入有：

$$\begin{aligned}
S_{\eta a}(\omega) &= \sum_{K=1}^N S_{\eta}(\omega_K) \Delta\omega [\delta(\omega - \omega_K) + \delta(\omega + \omega_K)] \\
\lim_{N \rightarrow \infty} S_{\eta a}(\omega) &= \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega') d\omega' [\delta(\omega - \omega') + \delta(\omega + \omega')] \\
&= \begin{cases} S_{\eta}(\omega) & \text{当 } \omega \geq 0 \\ S_{\eta}(-\omega) & \text{当 } \omega < 0 \end{cases}
\end{aligned}$$

这就说明了 $S_{\eta a}$ 与 S_{η} 是相一致的。可以看出当 N 为有限数时，平稳与各态历经性均可满足，但对谱函数，则要求有 $N \rightarrow \infty$ ，另外，从时间均值的推求看，采样或模拟的总时间 T 要足够长。所以，当 N 、 T 均为有限值时，以上各性质都只是近似的。

5、伪随机数。构成(1)式具有随机性的是随机变量 a_K ，在模拟时要用人工方法产生。人为造出随机数的方法常称为 Monte Carlo 法，它可产生有一定分布要求且相互独立的随机数，其中 $0-1$ 区间上的均匀分布的随机数是最基本的，在此基础上可产生满足其他分布的随机数。有关的方法可参见文献[2]，现多通过计算机产生，一些计算机高级语言中已把产生伪随机数作为标准函数，可方便地加以利用。伪随机数一般应经多种统计检验后方可使用。

对于波面的模拟除了(1)式的级数形式外，还有用积分表达的：

$$\eta^d(t) = \int_0^\infty \sqrt{\frac{2}{\pi}} S_\eta(\omega) d\omega \cos(\omega t + \varphi^d(\omega)) \quad (2)$$

这种积分被称作“伪积分”，可把它看成仅仅是一种记号，运用时认为它可化成(1)式的离散形式。还可以证明，对于各态历经过程，可用以下的积分表达：

$$\eta^d(t) = \int_0^\infty \sqrt{\frac{TS_\eta(\omega)}{\pi}} \cdot \cos(\omega t + \varphi^d(\omega)) d\omega \quad (3)$$

当要模拟的总时间 T 是有限量时，这一积分表达本身在数学含意上是明确的。在数值计算时，(2)(3)的离散形式与(1)式是可完全一致的。

抽去 $\eta^d(t)$ 的具体物理含意，模拟式(1)对其他物理量也适用，如造波板的位移等。

(二) 线性造波系统

不规则造波即通过对推波板位移量 $u(t)$ 的控制来实现水面上某点的随机波动，使该点的波面谱函数满足一定要求，或使该点的水面波动过程与某一要求的波列相似。控制 $u(t)$ 的依据有两个，一是被模拟量的特征，一是造波系统的特征。

把造波板的位移量 $u(t)$ 看成是一输入，距造波板一定距离处的水面波动 $\eta(t)$ 看成是输出，则 $u \sim \eta$ 之间就构成一系统，系统的特性由频响函数决定，它只与系统的构成有关（如推板型式、水深、测点距推波板的距离等），而与具体的 $u(t)$ 、 $\eta(t)$ 无关。线性系统指满足以下条件的系统：

$$\eta(\sum \alpha_i u_i(t)) = \sum \alpha_i \eta(u_i(t)) \quad (4)$$

若系统是线性的，系统完全由频响函数确定，且当输入是平稳、各态历经过程时，输出也是平稳、各态历经的(3)。针对造波问题，目前均采用定常线性系统假定(4)(5)(6)(7)，从而寻求其频响函数就成为不规则造波的基础，一旦该函数确定，由 $\eta(t)$ 构造 $u(t)$ 的依据就形成了。为分析的方便，把 $\eta(t)$ 看成是输入， $u(t)$ 看成是输出，则造波系统的频响函数为：

$$H(\omega) = \frac{S_{\eta u}(\omega)}{S_\eta(\omega)} \quad (5)$$

其中 $S_{\eta u}(\omega)$ 是 η 与 u 的互谱， $S_\eta(\omega)$ 是波面谱，这两个谱分别随 $u(t)$ 、 $\eta(t)$ 的不同而变化，但其比值是确定的。有了 $H(\omega)$ 便可进行谱模拟或波列模拟。

若仅要求谱模拟，可用关系式：

$$S_u(\omega) = |H(\omega)|^2 S_\eta(\omega) \quad (6)$$

这里 $S_u(\omega)$ 是推波板 $u(t)$ 的谱。通过一个任意的 $u_0(t)$ ，可测出相应的 $\eta_0(t)$ ，进而求出 S_{u_0} ， S_{η_0} ，由(4)式，可确定系统的功率谱增益因子 $|H(\omega)|^2$ 。当已知了 $|H(\omega)|^2$ ，便可按所要求的 $S_{\eta T}(\omega)$ 构成与之对应的 $S_u(\omega)$ ，利用上一节所述的方法，就可产生满足谱函数 $S_u(\omega)$ 的推板随机位移过程 $u(t)$ ，以 $u(t)$ 造浪，则所测波面的谱就应是 $S_{\eta T}(\omega)$ 。

若要进行波列模拟，则仅知 $|H(\omega)|^2$ 还不够，而应由(5)式直接求出 $H(\omega)$ ，由此进一步确定系统的单位脉冲响应：

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (7)$$

这样，当所要求的波列 $\eta(t)$ 已知时，可以下式求出 $u(t)$ 的过程：

$$u(t) = \int_0^\infty \eta(t-\tau) h(\tau) d\tau \quad (8)$$

当推波板以 $u(t)$ 造波时，测点处的波面就应是 $\eta(t)$ ，从而构成了波列的模拟。所以，当系统是定常线性系统时，从理论上讲，求得 $H(\omega)$ 后，无论是谱模拟或是波列模拟都是可能的。

造波系统的频响函数显然最理想是由试验定出，但为了加快模拟中的调试速度，常常首先是利用理论结果。规则波波高与推板在静水面处位移振幅间的理论关系由 Biesel 提出(4)，其前提是势流、线性表面条件，不难验证，由其结果形成的频响函数的模为：

$$|H(\omega)| = \begin{cases} \frac{4\pi D/L + \text{Sh}(4\pi D/L)}{4\text{Sh}(2\pi D/L)} & \text{活塞型} \\ \frac{2\pi D/L}{\text{Sh}(2\pi D/L)} \cdot \frac{4\pi D/L + \text{Sh}(4\pi D/L)}{1 - \text{Ch}(2\pi D/L) + (2\pi D/L) \text{Sh}(2\pi D/L)} & \text{摇摆型} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\omega^2 = (2\pi D/L) \cdot g \text{th}(2\pi D/L)$ ， D 、 L 、 g 分别是水深、波长和重力加速度。这一理论关系已为不少不规则波造波设备设计所采用，同时提出了大量验证结果，图1是文献(5)中规则波试验与(9)式的对比，可看出在 ω 为 $\pi \sim 2\pi$ ($0.5 \sim 1 \text{ Hz}$) 范围内，吻合良好，这一可运用范围，已能较好满足实验模拟的要求。对于不规则波，文献(6)对(9)式加以一定简化，并考虑相位因素，在离推波板10米处复现波列，结果良好，图2是现场记录与模拟值的对比，同样可见在高频部分往往是难以复现的。

实际运用频响函数时，即便与理论值有所差别也无影响，因在模拟时总是要不断修正驱动谱的，即几经反馈，调整最终的驱动信号 $u(t)$ ，以适应特定的频响函数。显然，根据特定的造波装置、特定的水深、测点位置、波浪序列的平均波高、平均波

周期，以试验来确定系统的实际频响函数，其精度一定是比理论值高的，然而理论关系又常构成第一次反馈的有效依据。

以上分析是基于线性系统假定的，而实际上由于水体运动的复杂性，系统是具有一定的非线性特征的。在距推波板较远处模拟波列的困难就说明了这一点，图1也反映了一个频率上 $H(\omega)$ 并非很集中，此外，某个时刻波面变化的量值 $\eta(t)$ 与该时刻的推板位移量 $u(t)$ 并不一一对应，即 $\eta(t)$ 与 $u(t)$ 的历程有关，这表明了系统是有记忆型的。非线性系统的特征是较复杂的，模拟通过有记忆非线性系统的随机过程就更复杂，可以说至今尚未能很好解决(3)，但对于具体的系统是有方法采用近似的手段来进行模拟的。

(三) 模拟中的迭代过程

当已知进行谱模拟或波列模拟的推板位移过程后，由于理论频响函数与实际值的差别等影响，一般在第一次模拟时总是不能与所要求的值完全吻合的，这就要经由实测的 $\eta(t)$ ，将欲修正的信息反馈给控制系统，修正 $u(t)$ ，直到被模拟量与要求的结果满足一定的精度为止，这里把这样的过程称为迭代。

迭代的控制方式有模拟控制与数字控制及两者组合等几类，模拟式一般以手动控制实现对 $u(t)$ 的修正，数字式以数字计算的自动方式及人机对话实现对 $u(t)$ 的迭代修正，前者较直观，后者的自动化程度高，两者的主要区别是模拟式控制的是 $u(t)$ 的谱，数字式直接控制 $u(t)$ ，故前者不可进行波列模拟，后者可进行谱模拟，也可进行波列模拟，两种方式目前均有采用，以下就谱模拟给出迭代过程。

1、数字控制式

数字式的系统框图见图3。

首先定出需要模拟的目标谱 $S_{\eta T}(\omega)$ ，再与理论的频响函数模的平方 $|H(\omega)|^2$ 相乘，得到第一次模拟的驱动谱 $S_{u1}(\omega)$ 并存储；产生 $0-2\pi$ 上均布的随机数 ϕ_K ，并求出 $\sin \phi_K$ 、 $\cos \phi_K$ 以形式 $A_K + 1B = \cos \phi_K - 1 \sin \phi_K$ ；根据第一节里的模拟方式，求出 $u(t)$ 在各频率上的振幅值 $C_K = \sqrt{2 S_{u1}(\omega_K) \Delta \omega / \pi}$ ；用调制好的相位 $A_K + 1B_K$ 与 C_K 相乘得模拟过程的富氏变换 $\sum_{K=1}^N C_K (A_K + 1B_K)$ ；利用逆快速富氏变换求出此过程的时间离散值，经D/A转换后得 $u(t)$ 的模拟信号电压，通过功率放大后，由驱动设备产生推板的运动。利用各态历经假定，可用一次实测值估计 $S_{\eta 1}(\omega)$ 。至此，便可进行 $S_{\eta 1}$ 与 $S_{\eta T}$ 的比较，并开始修正控制信号。

修正控制信号是通过修正驱动谱 S_{u1} 实现的。由于有线性系统假定，所以

$$\frac{S_{u1}}{S_{\eta 1}} = \frac{S_{u2}}{S_{\eta 2}} = \frac{S_{u3}}{S_{\eta 3}} = \frac{S_{u1}}{S_{\eta 1}} \quad (11)$$

其中 S_{u1} ——第1次用的驱动谱

$S_{\eta 1}$ ——第1次的实测波面谱

而一般 $S_{\eta 1}$ 总与 $S_{\eta T}$ 有差别, 故对 S_{u1} 进行修正得到 S_{u2} , 根据(11)式有:

$$S_{u2} = S_{u1} \left(\frac{S_{\eta 2}}{S_{\eta 1}} \right)$$

为使第2次的实测谱满足 $S_{\eta T}$, 则:

$$S_{u2} = S_{u1} (S_{\eta T} / S_{\eta 1})$$

若第2次的实测谱仍与 $S_{\eta T}$ 不相近, 则以同样方式修正 S_{u2} 得 S_{u3} , 仿此进行若干次迭代后, 直到 S_{η} 与 $S_{\eta T}$ 之比按一定的精度接近于1则迭代告完成。

第1次的修正系数除可用 $(S_{\eta T} / S_{\eta 1} - 1)$ 的形式外, 还可利用 $\alpha (S_{\eta T} / S_{\eta 1} - 1)$ 、 $(S_{\eta T} / S_{\eta 1} - 1)^2$ 、或 $(S_{\eta T} / S_{\eta 1} - 1)^{\frac{1}{2}}$ 等, 这是因为, 在修正 S_u 之后, 实测谱仍不满足 $S_{\eta T}$, 即有可能迭代的比要求过了头, 也可能修正的还不足, 若普遍修正的不足, 采用比值的平方预先加大修正幅度, 若普遍修正的过了头, 则可用比值的 $\frac{1}{2}$ 次方预先减少修正的幅度, 通过改变 α 的比值大于或小于1, 用 α 乘比值也是同样的目的, 即增加迭代的有效率, 加快逼近的速度, 所以迭代方法是可以有多种的, 在造波系统中, 究竟用哪种方法好, 这与系统本身的特性有关, 只能依据具体的造波设备而由实验确定。对于波列的模拟除了修正驱动信号的功率谱外, 还应修正相位谱, 其原理仍同上。

2、模拟控制式

模拟式的工作框图见图4。

它主要由模拟式信号发生器、带通滤波器、增益控制电路、混合器、功放等部分组成, 每部分的构成均是电路, 主要控制环节是增益控制, 迭代过程主要通过对增益的改变来完成。

随机信号源一般采用模拟式白噪声信号发生器, 它所产生的随机信号具有常值的功率谱即白谱。带通滤波器的作用是仅让在确定频段上的随机信号通过, 超出这一频率范围的信号衰减为零。增益控制即使约在各频段上信号的谱值达到所要求的驱动谱值。将各滤波器输出的信号按要求进行增益控制后送混合器再迭加成新的随机信号, 它的谱函数则应与所要求驱动谱相同, 由此信号经功放后送驱动设备, 通过实测谱及显示设备, 进一步改变各频带上的增益, 从而构成一个迭代过程。从其过程可以看出, 它不能进行波列的模拟, 其迭代过程是改变电路的参量。

对于产生推波板的不规则驱动信号, 合田良实认为用10个带通滤波器就可造出不规则波(4), 滤波器太少, 则频带过宽, 精度差。对于滤波器的频响特性则愈接近矩形函数愈易控制。若带通滤波器的频响特性是一较好的矩形函数, 则第K个频段上增益控制的放大因子为:

$$\beta_K = \frac{S_{uK}}{C} \quad (12)$$

其中 S_{uK} ——第 K 个频段上所要求的驱动谱值, $S_{uK} = |H(\omega_K)|^2 S_{\eta T}(\omega_K)$;
 C ——白噪声信号的谱常数。

若在该频带上实测谱与 $S_{\eta T}$ 不同, 则对 β_K 的修正量可仿上述数字式控制的方法进行。

实际上带通滤波器的频响曲线很难成为一理想的矩形函数, 各带通滤波器上都都会通过一些其他频带上的信号, 所以在求 β_K 时, 还应把通过其他滤波器而在本频段上所产生的增量计入, 然而这些增量又是随其他频段上的增益控制而变化的, 所以在实际迭代过程中要严格考虑这一问题是较困难。

为使迭代完成后的信号在使用时能保持一致, 现多采用一定方法把这一信号序列记录下来。另外, 模拟控制式也是可以自行控制的。

(四) 方向谱的模拟

波浪方向谱的模拟, 可通过控制一系列造波板的运动而完成〔8〕。这一系列造波板(如 50 多台造波机)的位移仅仅限制在同一个运动方向上。如活塞型, 就是每块推板都仅作来回移动, 且互相之间是平行的, 造波机连线与各造波板运动方向正好垂直。当要造出波向线与造波板连线成直角传播的规则波, 则各造波板简谐位移的振幅、频率、初相均相同。若要造出斜向规则波, 则各造波板简谐位移的振幅、频率相同, 但初相各异, 由图 5 的几何关系可确定各板的初相位为:

$$\psi_l = \omega t - K l b \cos \theta \quad (13)$$

ψ_l ——第 l 块造波板的相位, $l = 1, 2, \dots$,

θ ——波向线与造波板连线之夹角,

b ——每块造波板的宽度,

K ——波数,

当每块造波板以

$$u(t, l) = a |H(\omega)| \cos(\omega t - K l b \cos \theta)$$

运动时, 各板所造波的波峰连线就构成一规则斜向波, 波高为 $2a$, 波向线与造波板连线的夹角正好为 θ 。

显然, 这当中用到这样一些假定: 1、有一定宽度 b 的造波板所造的波基本上不发生绕射, 2、其波峰连线会自然平滑, 3、各造波板的造波性能与水槽内单方向不规则波造波的性能相一致。由这些假定可看出其中有这样一些不足: 1、各造波板所造波浪的绕射应消除, 2、斜向波中水质点的速度也应是斜向的, 但这里虽然波峰是斜向的, 但水质点的速度方向仍主要是平行于造波板运动方向的, 若实际港池内水质点的运动也是由于波峰的倾斜而倾斜, 则造波性能就应考虑与单方向的不规则波造波

性能有所不同, 3、这一造波设备只可能造出小于 180° 范围的波浪, 当 θ 接近 0° 与 180° 时, 是不能造出很好的波形的。

有了造出一个斜向波的基础, 则可根据系统的线性性, 造出在两个方向上传播的两个振幅、频率、初相各不同的规则波, 此时, 第 ℓ 块造波板的位移为:

$$u(t, \ell) = a_1 |H(\omega_1)| \cos(\omega_1 t - K\ell b \cos \theta_1 + \varphi_1) \\ + a_2 |H(\omega_2)| \cos(\omega_2 t - K\ell b \cos \theta_2 + \varphi_2)$$

对于多方向的不规则波, 波向 θ 有若干个, 对应每个 θ , 又有若干个频率, 依据上面的原理, 对应其中某个圆频率 ω_n , 波向 θ_m , 初相 φ_{nm} , 若已知波高为 a_{nm} , 则第 ℓ 块造波板的位移应是:

$$u_{nm}(t, \ell) = a_{nm} |H(\omega_n)| \cos(\omega_n t \\ - K\ell b \cos \theta_m + \varphi_{nm})$$

从而对所有 N 个圆频率、 M 个方向的合成运动, 有:

$$u(t, \ell) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{nm} |H(\omega_n)| \cos(\omega_n t \\ - K\ell b \cos \theta_m + \varphi_{nm}) \quad (14)$$

这当中 $a_{nm} = a_{nm}^e = S(\theta, \omega) \cdot \Delta\omega \cdot \Delta\theta / \pi$

$S(\theta, \omega)$ ——波浪的方向谱 (单侧谱)

$\Delta\omega, \Delta\theta$ ——分别是所划分的圆频率与波向的间隔。

φ_{nm} ——造不规则波时所用的随机初相, 相应于 n, m 均为 $0-2\pi$ 上的均匀分布的随机数, 且应是相互独立的。

在计算时, 可由下式求各板的位移:

$$u(t, \ell) = \sum_{n=1}^N [C_n, \ell \cos \omega_n t - S_n, \ell \sin \omega_n t] \quad (15)$$

其中 $C_n, \ell = \sum_{m=1}^M a_{nm} |H(\omega_n)| \cos(\varphi_{nm} - K\ell b \cos \theta_m)$

$$S_n, \ell = \sum_{m=1}^M a_{nm} |H(\omega_n)| \sin(\varphi_{nm} - K\ell b \cos \theta_m)$$

这些式子是通过快速富氏变换求得的。

对于这样造出的波,在要求的实测点处实测出方向谱 $S(\omega, \theta)$,与期望值进行比较,若存在差别,则修正驱动谱,方法同上一节,实测方向谱的方法有多种,可参见文献〔4〕。

(五) 结 语

不规则波造波设备已有了较成熟的理论与实践基础,从造波原理的大致过程与使用现状看,造波系统在某些方面还可以进一步完善,如:1、适应更广泛水深条件的推波方式及造波特性的研究,2、对于系统非线性性的考虑,3、更为有效地模拟波列及方向谱的方法,4、迭代的优化等。

参考文献

- 〔1〕 何成慧等译:《随机振动概论》,上海交大出版社,1984年。
- 〔2〕 王梓坤:《概率论基础及运用》,科学出版社,1979年。
- 〔3〕 吴祈耀:《随机过程》,国防工业出版社,1984年。
- 〔4〕 合田良实:《港口建筑物的防浪设计》,海洋出版社,1983年。
- 〔5〕 Norman.B.W.et,"A Programable Wave Generator", Proc. of 14th Coastal Engineering Conference, 1974.
- 〔6〕 Helge.G.et,"Model Tests With Directly Reproduced Nature Wave Train", Proc. of 14th Coastal Engineering Conference. 1974.
- 〔7〕 合田良实:“不规则波浪实验とその特性について”,第21回海岸工学講演会论文集,1974年。
- 〔8〕 高山知司等,“サーベント型造波装置の制御方式と造波特性”,港湾技研資料, No.509, 1984年。

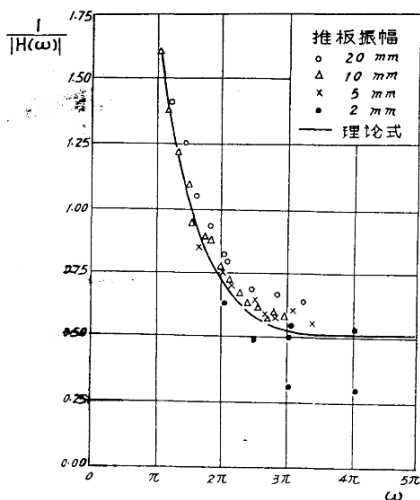


图 1 造波性能图

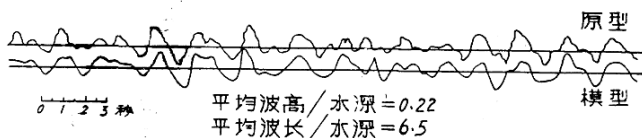


图 2 波列模拟的实例